



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Unand.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Unand.

# **PERANCANGAN MODEL SIMULASI PLT TERSAMBUNG OPTIMAL UNTUK PENYEDIAAN ENERGI LISTRIK RUMAH TUNGGAL**

## **TESIS**



**KIKI KANANDA**  
**1120952029**

**PROGRAM PASCASARJANA**  
**UNIVERSITAS ANDALAS**  
**2013**

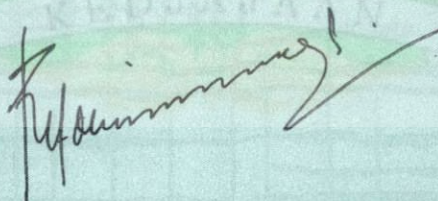
**LEMBAR PENGESAHAN**

**PERANCANGAN MODEL SIMULASI PLTS  
TERSAMBUNG KE GRID YANG OPTIMAL  
UNTUK PENYEDIAAN ENERGI LISTRIK  
RUMAH TINGGAL**

**Lulus Sidang Tesis Tanggal: 29 November 2013**

**Disetujui Oleh:**

**Pembimbing,**



**Ir. Refdinal Nazir, MSEE., Ph.D**

**NIP.195809281986031001**



UNIVERSITAS ANDALAS

*For my lovely family*

*Speciallly*

*my Mom n' Dad*

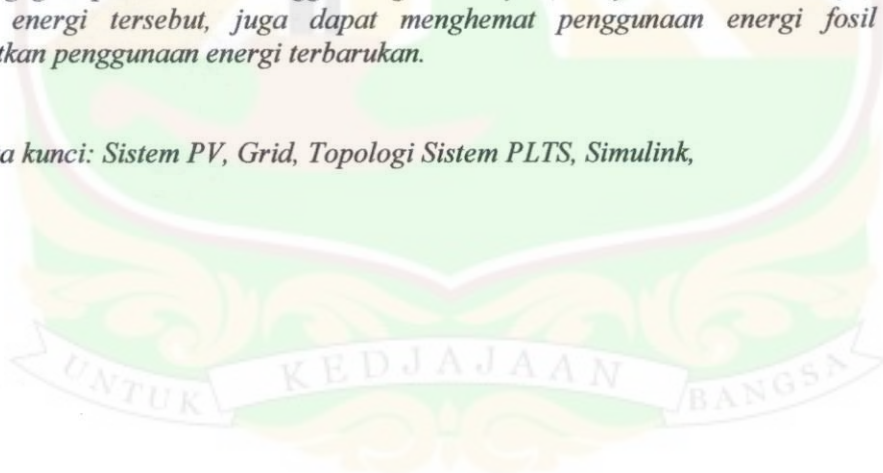
UNTUK KEDJAJAAN BANGSA



## ABSTRAK

Pemanfaatan energi terbarukan merupakan isu yang sangat penting dalam upaya untuk mengurangi penggunaan energi fosil yang makin menipis. Mengingat pengguna terbesar energi listrik yang dikelola oleh PLN adalah sektor rumah tangga hingga 41.21% dari total energi listrik yang disediakan oleh PLN. Untuk itu energi surya merupakan salah satu energi terbarukan sebagai alternatif yang mudah digunakan untuk penyediaan listrik rumah tinggal di Indonesia, dengan membangun pembangkit tenaga surya. Untuk daerah yang tersedia jaringan listrik (on Grid), penggunaan PLTS melalui SHS tidak dapat dikembangkan karena harga energi listriknya lebih mahal dari listrik PLN. Dengan teknologi PLTS tersambung ke grid (jaringan PLN), penggunaan baterai pun dapat dikurangi. Pada penelitian ini pemodelan panel surya 60 Watt SHARP ND-T060M1 menggunakan MATLAB simulink 2012 dengan melihat karakteristik hasil simulasi. Kemudian dibentuk PV array dengan menghubungkan seri 10 buah panel surya. Adapun topologi yang digunakan adalah sistem tanpa baterai storage dan DC-DC converter. Pemodelan grid dan beban rumah tangga juga dilakukan. Setelah penyambungan dengan grid, sistem PLTS tidak bekerja optimal, bahkan berlaku sebagai beban dalam sistem. Oleh karena itu dirancang sistem kontrol sederhana untuk optimalisasi sistem. Hasil kerja kontrol sistem adalah tegangan titik PCC sistem konstan  $\approx 220$  Volt dan nilai daya reaktif  $Q$  sistem PLTS telah seminimum mungkin dengan maksimum pengujian 24,64Var. Daya aktif maksimum sistem PLTS didapat 419,2 W. Dimana pengujian telah dilakukan untuk berbagai variasi input irradiansi dan beban rumah tangga. Dari hasil pengujian, sistem PLTS selalu menjadi sumber daya dan dapat mentransfer daya ke grid saat berlebih. Sehingga menjadi keuntungan sistem PLTS tersambung grid pada rumah tangga dengan adanya (transfer dan terima daya) pola buy-back energi tersebut, juga dapat menghemat penggunaan energi fosil dan meningkatkan penggunaan energi terbarukan.

Kata kunci: Sistem PV, Grid, Topologi Sistem PLTS, Simulink,





## KATA PENGANTAR



Terima kasih dan puji syukur Alhamdulillah penulis ucapkan kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul *Perancangan Model Simulasi PLTS Tersambung ke Grid yang Optimal Untuk Penyediaan Energi Listrik Rumah Tinggal*. Tesis ini merupakan salah satu mata kuliah wajib yang diikuti sebagai syarat untuk memperoleh gelar Master (Strata 2) di Program Studi Master Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Andalas.

Dalam menyelesaikan Tesis, penulis banyak mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar -besarnya kepada:

1. Ibu dan Bapak yang telah memberikan semuanya buat penulis dan juga kakak-kakak yang selalu menyemangati penulis.
2. Bapak Refdinal Nazir, Ph.D selaku pembimbing Tesis yang telah banyak membantu, meluangkan waktu untuk membimbing, mendidik dan membagi ilmu serta saran pada penulis selama ini.
3. Bapak DR. Eng Ariadi Hazmi selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas dan



4. Staf dan karyawan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas
5. Rekan-rekan Program Studi Master Teknik Elektro, terutama angkatan '11 dan LKEE's *team*.
6. Seluruh pihak yang telah memberikan kontribusinya kepada penulis dalam menyelesaikan laporan ini.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih terdapat beberapa kekurangan karena keterbatasan pengetahuan dan kekhilafan penulis, maka penulis sangat mengharapkan kritik maupun saran demi kesempurnaan Tesis ini.

Atas bantuan yang telah diberikan oleh semua pihak menyelesaikan Tesis ini, penulis mengharapkan semoga amal yang telah diberikan mendapat balasan dari Allah SWT, Amin. Akhir kata harapan penulis semoga laporan Tesis ini dapat memberikan manfaat bagi semua pembaca, dan penulis juga tentunya.

Padang, 2013



## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK.....</b>	<b>i</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	5
1.3. Batasan Masalah.....	5
1.4. Tujuan penelitian.....	5
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
1.6. Sistematika Penulisan.....	6
<b>BAB II KAJIAN PUSTAKA</b>	
2.1. <i>Photovoltaic</i> .....	7
2.2. <i>Boost Converter</i> .....	10
2.3. Inverter Satu fasa.....	11
2.4. Tipe Sistem Photovoltaik (PV).....	14
2.4.1 <i>Stand Alone</i> .....	14
2.4.2 <i>Hybrid</i> .....	15
2.4.3 <i>Grid Connected</i> .....	17



2.5. Topologi Sistem Photovoltaic Tersambung Grid.....	20
2.5.1 Topologi Sistem dengan Baterai.....	20
2.5.2 Topologi Sistem tanpa Baterai.....	22
2.5.3 Beberapa Sistem Topologi Converter.....	23
2.6. Pengontrolan MPPT Sistem Photovoltaic .....	32
2.6.1 Metode Perturb dan Observe (P&O).....	32
2.6.2 Metode Rangkaian Open dan Short.....	33
2.6.3 Algoritma Konduktansi Incremental.....	33
2.6.4 Algoritma Fuzzy Logic dan Lainnya.....	34
2.7. Optimalisasi Sistem Photovoltaic Tersambung Grid.....	34

### **BAB III METODE PENELITIAN**

3.1. Model Rancangan Sistem PLTS Tersambung ke Grid Pada Rumah Tinggal.....	37
3.2. Pemodelan Simulasi Rancangan Sistem PLTS Tersambung ke Grid Pada Rumah Tinggal.....	40
3.2.1 Pemodelan Panel Surya.....	41
3.2.2 Pemodelan Grid.....	43
3.2.3 Pemodelan Beban.....	44
3.2.4 Perancangan Sistem Kontrol.....	45
3.3. Pengujian Sistem.....	47
3.3.1 Rangkaian Pengujian Karakteristik Panel Surya.....	47
3.3.2 Rangkaian Pengujian PV Array.....	47
3.3.3 Rangkaian Pengujian PV Array dan Inverter.....	48



3.3.4 Rangkaian Pengujian Sistem PLTS .....	50
3.3.5 Rangkaian Pengujian Sistem PLTS Tersambung Grid tanpa Kontrol dan dengan Kontrol.....	51

#### **BAB IV HASIL DAN ANALISA**

4.1. Hasil Pengujian Sistem.....	55
4.1.1 Karakteristik Panel Surya.....	55
4.1.2 Karakteristik PV Array.....	56
4.1.3 PV Array dengan Inverter.....	57
4.1.4 Sistem PLTS.....	58
4.1.5 Sistem PLTS Tersambung Grid tanpa Kontrol dan dengan Kontrol .....	59
4.2. Analisa.....	75

#### **BAB V PENUTUP**

5.1. Kesimpulan.....	80
5.2. Saran.....	81

#### **DAFTAR PUSTAKA**

#### **LAMPIRAN**

## DAFTAR TABEL

Table 3.1	Spesifikasi SHARP ND T060M1.....	40
Tabel 3.2	<i>Electro Optical Characteristic</i> SHARP ND T060M1.....	41
Tabel 4.1	Aliran Daya Sistem PLTS Tersambung Grid tanpa Kontrol...	59
Tabel 4.2	Aliran Daya Sistem PLTS Tersambung Grid Irradiasi Konstan.....	63
Tabel 4.3	Aliran Daya Sistem PLTS Tersambung Grid Beban Konstan..	66
Tabel 4.4	Aliran Daya Sistem PLTS Tersambung Grid Irradiasi dan Beban Berubah .....	70





## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Bauran Sumber Energi Kelistrikan Indonesia.....	1
Gambar 1.2	Jumlah Energi Terjual Per Jenis Pelanggan.....	2
Gambar 2.1	Model Diode Tunggal Rangkaian PV.....	7
Gambar 2.2	Karakteristik I-V dan P-V Sel Photovoltaic.....	9
Gambar 2.3	Karakteristik Arus Daya terhadap Tegangan (Temperatur Modul 25°C) .....	9
Gambar 2.4	Boost Converter.....	10
Gambar 2.5	(a) Inverter Jembatan Satu Fasa (b) Bentuk Gelombang Inverter Jembatan Satu Fasa .....	12
Gambar 2.6	Sinusoidal Pulse Width Modulation.....	13
Gambar 2.7	Proses Pembentukan SPWM Menggunakan Komparator.....	13
Gambar 2.8	Sistem PV Stand Alone.....	15
Gambar 2.9	Sistem Energi Hybrid Seri.....	16
Gambar 2.10	Sistem Energi Hybrid Switch.....	16
Gambar 2.11	Sistem Energi Hybrid Paralel.....	16
Gambar 2.12	Sistem PV dengan Interface Inverter Tersambung Grid ....	19
Gambar 2.13	Topologi Cascade Couple Structure.....	21
Gambar 2.14	Topologi DC Couple Structure.....	22
Gambar 2.15	Topologi Dengan Transormator.....	22
Gambar 2.16	Topologi Tanpa Transformator.....	23
Gambar 2.17	Topologi Inverter Terpusat (Centralized).....	24

Gambar 2.18	Topologi Inverter String .....	25
Gambar 2.19	Topologi Inverter Multi String.....	26
Gambar 2.20	Topologi Inverter Kompleks.....	27
Gambar 2.21	Topologi Inverter Flyback.....	27
Gambar 2.22	Topologi Inverter Flyback Current Fed.....	28
Gambar 2.23	Topologi Converter DC/DC Resonansi Seri dan Converter Terhubung Jembatan Grid.....	29
Gambar 2.24	Topologi Single Stage Multiple Module.....	29
Gambar 2.25	Topologi Diode Clampe Setengah Jembatan.....	30
Gambar 2.26	Topologi 2 Stage Multiple Module (a)Module Dipasang Seri (b)Konverter DC Terpisah Tiap Module.....	31
Gambar 2.27	Topologi Multistring (a) Setengah Jembatan Bersama (b) Konverter Jembatan Penuh.....	32
Gambar 2.28	(a) Interface Sistem Grid Sederhana (b) Diagram Fasor Grid Tersambung PV.....	35
Gambar 3.1	Pemodelan PLTS Tersambung Ke Sistem Grid Pada Rumah Tinggal.....	37
Gambar 3.2	Daya Keluaran Modul PV Saat Cuaca Cerah.....	38
Gambar 3.3	Pola Aliran Daya Sistem PLTS Terhubung Grid Pada Rumah Tinggal.....	39
Gambar 3.4	Rangkaian Model Simulink Panel Surya.....	41
Gambar 3.5	Model Simulink Persamaan Pengganti $I_{ph}$ .....	42
Gambar 3.6	Model Simulink Persamaan Pengganti $I_d$ .....	43



Gambar 3.7	(a) Model Simulink Sistem Grid (b) Blok Parameter Transformator Sistem Grid.....	44
Gambar 3.8	Model Simulink Beban Rumah.....	44
Gambar 3.9	Model Simulink Persamaan Sistem Kontrol.....	45
Gambar 3.10	Rangkaian Simulink Pengujian Karakteristik Panel Surya ..	47
Gambar 3.11	(a) Rangkaian Simulink Membentuk PV Array dan (b) Rangkaian Pengujian PV Array.....	48
Gambar 3.12	(a) Rangkaian Simulink Pengujian Inverter PV (b) Rangkaian Gate Inverter.....	49
Gambar 3.13	Blok Parameter (a) Kapasitor DC Link dan (b) Inverter PV..	49
Gambar 3.14	(a) Model Simulink Sistem PLTS dengan Filter dan Transformator (b) Blok Parameter Transformator Sistem PLTS.....	50
Gambar 3.15	Rangkaian Pengujian Sistem PLTS Tersambung Grid.....	51
Gambar 3.16	Signal Input Irradiasi PV .....	52
Gambar 3.17	Rangkaian Gate Inverter Sistem PV Tersambung Grid tanpa Kontrol.....	52
Gambar 3.18	Signal Irradiasi Konstan $1000\text{W/m}^2$ .....	53
Gambar 3.19	Variasi Beban Rumah.....	53
Gambar 3.20	Signal Irradiasi Variasi $1000,600,\text{dan }500\text{W/m}^2$ .....	54
Gambar 3.21	Beban Rumah Konstan.....	54
Gambar 4.1	Kurva Karakteristik IP-V Panel Surya.....	55

Gambar 4.2	Kurva Karakteristik IP-V PV Array.....	56
Gambar 4.3	Keluaran PV Array Dengan Input Irradiasi Berubah.....	56
Gambar 4.4	Keluaran Inverter yang Tersambung PV Array.....	57
Gambar 4.5	Bentuk Gelombang Keluaran Sistem PLTS.....	58
Gambar 4.6	Kurva Aliran Daya Sistem tanpa Kontrol.....	59
Gambar. 4.7	Kurva Tegangan PCC Sistem tanpa Kontrol.....	60
Gambar 4.8	Kurva Aliran Arus Sistem tanpa Kontrol.....	60
Gambar 4.9	Bentuk Gelombang Sisi Sistem PLTS tanpa Kontrol .....	61
Gambar 4.10	Bentuk Gelombang Sisi Sistem Grid tanpa Kontrol .....	62
Gambar 4.11	Bentuk Gelombang Sisi Beban Rumah tanpa Kontrol.....	62
Gambar 4.12	Kurva Aliran Daya Sistem Irradiasi Konstan.....	64
Gambar 4.13	Kurva Tegangan PCC Sistem Irradiasi Konstan.....	64
Gambar 4.14	Kurva Arus Sistem Irradiasi Konstan.....	65
Gambar 4.15	Kurva Aliran Daya Sistem Beban Konstan.....	66
Gambar 4.16	Kurva Tegangan PCC Sistem Beban Konstan.....	67
Gambar 4.17	Kurva Arus Sistem Beban Konstan.....	67
Gambar 4.18	Kurva Aliran Daya Sistem Irradiasi dan Beban Berubah .....	68
Gambar 4.19	Kurva Tegangan PCC sistem irradiasi dan beban berubah...	68
Gambar 4.20	Kurva Arus Sistem Irradiasi dan Beban Berubah.....	69
Gambar 4.21	Bentuk Gelombang Sistem Sisi Sistem PLTS t-1.....	71
Gambar 4.22	Bentuk Gelombang Sistem Sisi Grid t-1.....	71
Gambar 4.23	Bentuk Gelombang Sistem Sisi Beban Rumah t-1.....	72
Gambar 4.24	Bentuk Gelombang Sistem Sisi Sistem PLTS t-2.....	72



Gambar 4.25	Bentuk Gelombang Sistem Sisi Grid t-2.....	73
Gambar 4.26	Bentuk Gelombang Sistem Beban Rumah PLTS t-2.....	73
Gambar 4.27	Bentuk Gelombang Sistem Sisi Sistem PLTS t-3.....	74
Gambar 4.28	Bentuk Gelombang Sistem Sisi Grid t-3.....	74
Gambar 4.29	Bentuk Gelombang Sistem Sisi Beban Rumah t-3.....	75



## DAFTAR SIMBOL

$I$	= Arus keluaran panel surya (A)
$I_{ph}$	= Arus photovoltaic (A)
$I_d$	= Arus diode (A)
$I_p$	= Arus parallel (A)
$I_s$	= Arus saturasi diode (A)
$q$	= Muatan elektron (C)
$a$	= Faktor ideal diode
$k$	= Konstanta Boltzman (J/K)
$T_c$	= Temperatur sel ( $^{\circ}K$ )
$N_s$	= Jumlah seri
$N_p$	= Jumlah paralel
$V_d$	= Tegangan diode (V)
$R_p$	= Hambatan parallel ( $\Omega$ )
$R_s$	= Hambatan seri ( $\Omega$ )
$V$	= Tegangan terminal panel surya (V)
$V_t$	= Tegangan termal (V)
$I_{rr}$	= Irradiasi ( $W/m^2$ )
$I_{sc}$	= Arus hubung singkat (A)
$K_i$	= Koefisien temperatur arus ( $\%/^{\circ}K$ )
$T_r$	= Temperature referensi sel ( $^{\circ}K$ )
$I_{rs}$	= Arus saturasi balik diode (A)



$E_g$	= Energi gap silicon (eV)
$V_{oc}$	= Tegangan open sirkuit (V)
$V_m$	= Tegangan maksimum (V)
$I_m$	= Arus maksimum (A)
$I_{sc}^m$	= Arus hubung singkat PV array (A)
$V_{oc}^m$	= Tegangan open sirkuit PV array (V)
$R_s^m$	= Hambatan seri PV array ( $\Omega$ )
$I_{sc}^c$	= Arus hubung singkat panel surya (A)
$V_{oc}^c$	= Tegangan open sirkuit panel surya (V)
$R_s^c$	= Hambatan seri panel surya ( $\Omega$ )
$V_{dc}$	= Tegangan DC (V)
$V_o$	= Tegangan output (V)
$D$	= Duty cycle
$T$	= Periode (s)
$L$	= Induktansi (H)
$I_L, I_{beban}$	= Arus beban (A)
$R$	= Hambatan ( $\Omega$ )
$m_a$	= Indeks modulasi
$I_{pwm}$	= Arus inverter (A)
$V_{pwm}, V < \delta$	= Tegangan inverter (V)
$I_f$	= Arus filter (A)
$V_f$	= Tegangan filter (V)
$V < 0, V_g$	= Tegangan grid ( $V_{pcc}$ )

$dP/dV$  = Turunan arus terhadap tegangan

$S$  = Daya semu (VA)

$P$  = Daya aktif (W)

$Q$  = Daya reaktif (Var)

$X_L$  = Reaktansi saluran ( $\Omega$ )

$\delta$  = Sudut fasa



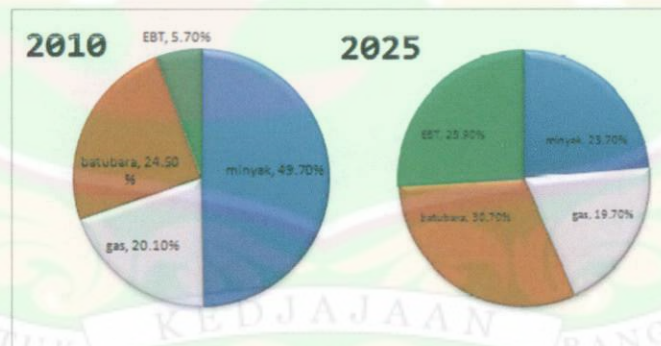


# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

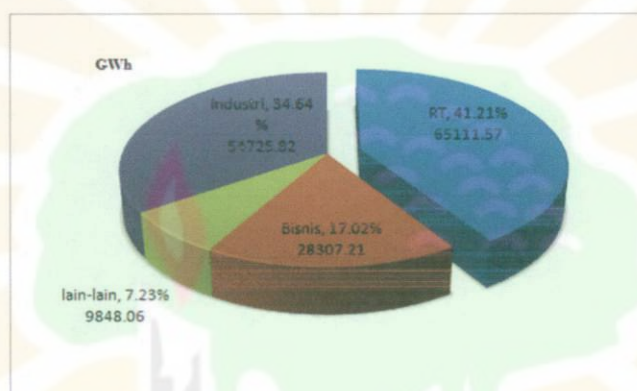
Pemanfaatan energi terbarukan adalah isu yang sangat penting dalam upaya mengurangi penggunaan energi fosil yang makin menipis saat ini [1]. Di Indonesia pemakaian energi fosil, seperti BBM dan batubara masih pada rating teratas sebagai sumber energi primer pada pembangkit-pembangkit listrik. Dewan Energi Nasional (DEN) telah menskenariokan pada tahun 2025 pemanfaatan energi terbarukan (EBT) di Indonesia menjadi berimbang dengan pemakaian energi fosil. Penggunaan energi EBT dari 5.7% diharapkan meningkat hingga 25.9% pada tahun 2025 [2] seperti diperlihatkan oleh gambar 1.1.



Gambar 1.1. Bauran Sumber Energi Kelistrikan Indonesia[2]

Fakta lainnya, berdasarkan statistik PLN 2011 [3], pengguna terbesar dari energi listrik yang dikelola PT.PLN adalah sektor rumah tangga, dengan persentase mencapai 41.21% dari seluruh energi listrik yang disediakan oleh PLN

(lihat Gambar 1.2 ). Pemanfaatan energi listrik pada sektor rumah tangga umumnya bersifat konsumtif, tidak menghasilkan barang atau jasa yang dapat menambah pendapatan. Selain itu, beban listrik rumah tangga umumnya sangat fluktuatif, sehingga faktor bebannya rendah. Hal ini akan berakibat kepada tingginya biaya investasi untuk membangun sarana penyediaan energi listrik, sehingga harga penyediaan energi listrik oleh PLN menjadi tinggi.



Gambar 1.2. Jumlah Energi Terjual Per Jenis Pelanggan [3]

Untuk kedua permasalahan tersebut, energi surya yang merupakan salah satu sumber terbarukan dapat dijadikan sebagai alternative yang bersih dan rendah perawatan untuk penyediaan listrik rumah tinggal [1] [5] di Indonesia. Umumnya pemanfaatan energi surya untuk rumah tinggal di Indonesia digunakan pada daerah terisolir dari jaringan listrik (*off grid*) dengan sistem SHS (*Solar Home Sistem*). Sistem SHS menggunakan baterai sebagai penyimpan energi listrik ketika daya dibangkitkan SHS melebihi daya dibutuhkan beban. Baterai merupakan komponen yang termahal dalam sistem SHS. Untuk penggunaan pada daerah yang sudah tersedia jaringan listrik (*On Grid*), SHS tidak dapat berkembang



penggunaannya karena harga energi listriknya jauh lebih mahal dari harga energi listrik PLN [6].

Dukungan pemerintah untuk mengatasi masalah ketersediaan sumber energi fosil dan pengembangan energi terbarukan adalah melalui beberapa kebijakan energi diantaranya melalui PP No 14 tahun 2012 [4]. Pemerintah (dalam hal ini PLN) memberi kesempatan untuk memanfaatkan secara bersama dengan kosumen jaringan distribusi dengan sistem sewa jaringan distribusi. Ke depannya untuk daerah *On grid*, penggunaan SHS dapat diganti dengan PLTS tersambung ke grid PLN. Dengan teknologi PLTS tersambung ke grid (jaringan PLN) maka penggunaan baterai pada SHS untuk sebuah rumah tinggal dapat ditiadakan.

Adapun keuntungan sistem PLTS tersambung ke grid adalah sebagai berikut [1][5][7][10]:

1. Biaya investasi dan perawatan sangat berkurang karena tidak perlu battery.
2. Pada saat daya dari PLTS lebih besar daripada beban (penggunaan listrik rumah kita), kelebihan daya bisa disalurkan/dijual ke jaringan listrik. Jadi tagihan rekening listrik kita bisa berkurang.
3. Lebih ramah lingkungan karena mengurangi sampah baterai yang memerlukan perlakuan khusus dan kurang ramah terhadap lingkungan.
4. Pengurangan jaringan (transmisi dan distribusi)

Banyak penelitian yang telah ada tentang sambungan PLTS ke grid diantaranya; [9] tentang pengontrolan PV tersambung grid memanfaatkan jaringan wireless, perangkat PLC dan konsep ini dapat memberikan performa efektif dalam monitoring dan dapat dikontribusikan pada sistem *smart grid*, [10] menjelaskan

kontrol PV-grid dengan pendekatan *design zero dynamic* dan PV dapat memberikan daya maksimum ke grid dalam sistem skala luas, [11] menjelaskan bahwa pengintegrasian sistem PV ke grid dapat menunjang kinerja jaringan grid dengan menyertakan sistem storage serta [12] menunjukkan perhitungan teknis ekonomi sistem PV untuk sebuah rumah tinggal sistem stand-alone dengan memanfaatkan battery dan masih banyak kajian tentang PV lainnya.

Pemodelan sistem dalam simulasi juga telah dilakukan antaranya [13] menjabarkan simulasi MATLAB kontrol PV dengan MPPT dan penggunaan inverter *bidirectional* terhubung grid dalam pemasokan beban DC dan juga pemodelan karakteristik PV sendiri antaranya oleh [5] menggunakan MATLAB dan [1] berhasil menggambarkan karakteristik sel surya dengan software lab VIEW. Namun penelitian-penelitian tersebut masih menggunakan bateray dan aplikasinya dalam skala luas. Untuk aplikasi rumah tinggal, belum ada perhitungan pengaruh terhadap jaringan distribusi terutama tegangan saat daya yang dihasilkan PLTS besar. Maka dari itu, penelitian ini yang juga merupakan kelanjutan penelitian sebelumnya tentang penyambungan PV ke sistem grid dengan sistem paralelisasi masih secara manual, akan memperkenalkan konsep pengaturan sistem PLTS tersambung ke grid pada skala yang lebih kecil yaitu pada rumah tinggal. Dimana tidak ada lagi penggunaan baterai dengan pengaturan sederhana agar penggunaan daya PLTS optimal.

Dengan konsep ini dan memanfaatkan kebijakan pemerintah dalam pengembangan penggunaan *renewable energy* secara *on grid* maka ada kesempatan atau peluang untuk memanfaatkan energi surya secara optimal untuk penyediaan listrik bagi rumah tinggal secara berkesinambungan.



## 1.2. Perumusan Masalah

Pengaturan agar pada sistem PLTS tersambung ke grid pada rumah tinggal menggunakan energi sesuai dengan jumlah energi yang dihasilkan oleh PLTS dalam rentang waktu tertentu, sehingga penggunaan energi dari grid dalam rentang tersebut adalah nol atau mendekati nol. Jadi perlu diketahui bagaimana merancang sistem PLTS tersambung ke grid tersebut yang optimal untuk penyediaan energi listrik rumah tinggal.

## 1.3. Batasan Masalah

Adapun ruang lingkup penelitian adalah:

- a. Sistem yang digunakan adalah koneksi PLTS (*PV home system*) dengan grid (PLN) satu fasa.
- b. Beban adalah beban rumah tinggal yang diasumsikan dengan beban Resistif dan induktif (RL).
- c. Tidak membahas harmonisa yang dihasilkan oleh sistem PLTS.

## 1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah merancang model sistem PLTS tersambung ke grid yang optimal untuk penyediaan listrik rumah tinggal.

## 1.5. Manfaat Penelitian

- a. Sebagai Pengembangan sistem mandiri energi untuk daerah terpencil
- b. Salah satu pengembangan pemanfaatan *renewable* energi

- c. Dapat digunakan sebagai panduan aplikasi *PV home system* yang optimal dan handal

## 1.6. Sistematika Penulisan

Dalam penulisan laporan tesis ini, penulis menggunakan sistematika penulisan sebagai berikut:

### BAB I Pendahuluan

Bab ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

### BAB II Kajian Pustaka

Bab ini berisikan konsep *photovoltaic*, *boost converter*, inverter satu fasa serta pembentukan SPWM. Juga menyajikan topologi sistem PLTS dan inverternya.

### BAB III Metode Penelitian

Bab ini berisikan pemodelan sistem grid tersambung PLTS pada rumah tinggal dan simulasi sistem dengan MATLAB 2012

### BAB IV Hasil dan Analisa

Bab ini berisikan hasil dan analisa pengujian model simulasi pada sistem grid tersambung PLTS pada rumah tinggal.

### BABV Penutup

Bab ini merupakan penutup laporan yang berisikan kesimpulan dan saran



## BAB II

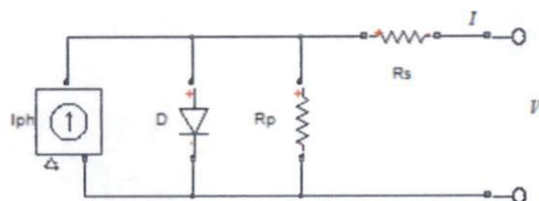
### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1. Photovoltaic

Sistem *photovoltaic* (PV) adalah peralatan yang mengkonversi energi surya menjadi energi listrik. PV terdiri dari beberapa sel surya, yang tiap sel terhubung dengan lainnya secara seri atau parallel untuk membentuk deretan PV yang secara umum disebut *PV modules* [5]. Efisiensi operasi maksimum sel surya tergantung pada titik operasi maksimum (MPP) dari sistem PV. Dalam pengoperasiannya, kinerja PV sangat dipengaruhi oleh kondisi klimatologi daerah setempat (temperatur lingkungan dan radiasi matahari) dan parameter listriknya (*short circuit current*, *open circuit voltage*, temperatur sel PV, MPP, dan sebagainya) [5][10][13].

Karakteristik sistem PV sangat tidak linear yang dipengaruhi oleh faktor eksternal. *Solar irradiation*, temperatur dan kecepatan angin adalah faktor lingkungan utama yang mempengaruhi PV [10].

*Photovoltaic* pada umumnya mempunyai hambatan parasitik seri dan hambatan paralel yang berpengaruh pada penurunan efisiensi, seperti ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Model Diode Tunggal Rangkaian PV

Persamaan model dioda tunggal yang digunakan untuk menggambarkan arus operasional yang dihasilkan modul PV dinyatakan dengan persamaan [1][5][10]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1)$$

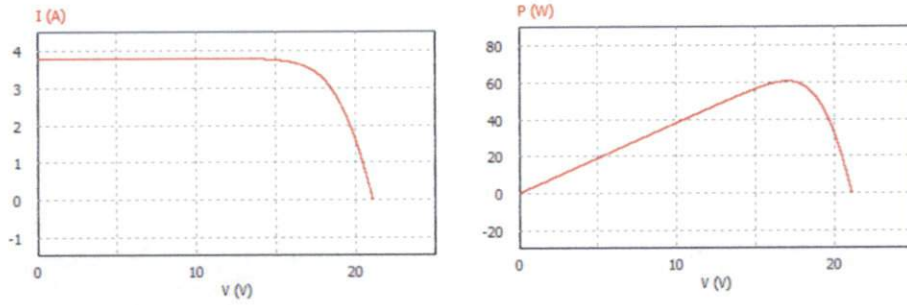
$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q}{akT_c N_s} V_d} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad (2)$$

$$V_d = V + IR_s \quad (3)$$

dengan  $I_{ph}$  arus yang dibangkitkan cahaya (A),  $I_s$  arus jenuh balik pada sambungan dioda p-n (A),  $R_s$  hambatan seri pada sel PV ( $\Omega$ ),  $R_p$  hambatan paralel sel PV ( $\Omega$ ),  $N_s$  jumlah sel yang tersusun seri,  $a$  faktor ideal dioda, dan  $V_t$  tegangan termal (V) yang dinyatakan sebagai :

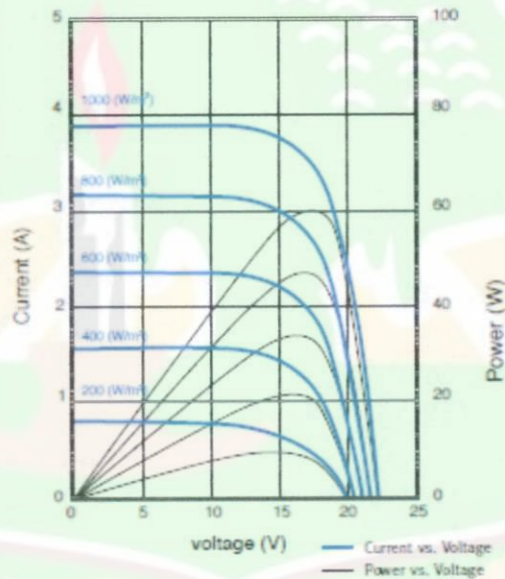
$$V_t = \frac{kT_c}{q} \quad (4)$$

dengan  $T_c$  temperatur sel (K),  $k$  konstanta Boltzmann (JK<sup>-1</sup>) dan  $q$  muatan elektron (C). Hambatan *shunt* atau hambatan paralel  $R_p$  menunjukkan arus yang bocor (*leakage*) pada sambungan p-n diode.



Gambar 2.2 Karakteristik I-V dan P-V Sel Photovoltaic

Perubahan radiasi matahari menyebabkan pergeseran kurva PV dan perubahan temperatur memicu perubahan tegangan dan arus *output* dari PV.



Gambar 2.3 Karakteristik Arus Daya Terhadap Tegangan

(Temperatur Modul 25°C)[16]

$$I_{ph} = \frac{I_{rr}}{1000} [I_{sc} + K_i (T_c - T_r)] \quad (5)$$

$$I_s = I_{rs} \left( \frac{T_c}{T_r} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{ak} \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_r} \right)} \quad (6)$$



$$I_{fs} = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{qV_{oc}}{akT_c N_s}} - 1} \quad (7)$$

$$R_s = \frac{(V_{oc} - V_m) / N_s}{I_m} \quad (8)$$

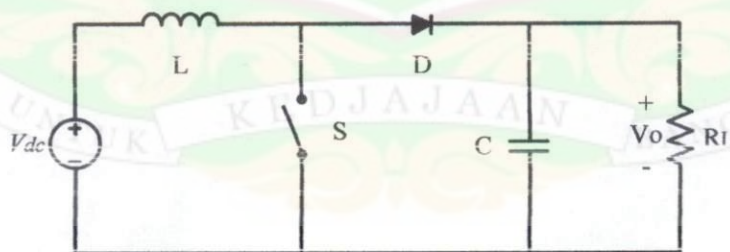
Untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus dengan nilai tertentu, maka panel surya dapat dipasang secara seri dan paralel, dimana nilai parameter tertentu menjadi [21]

$$I_{sc}^M = N_p I_{sc}^C \quad (9)$$

$$V_{oc}^M = N_s V_{oc}^C \quad (10)$$

$$R_s^M = \frac{N_s}{N_p} R_s^C \quad (11)$$

## 2.2. Boost Converter



Gambar 2.4 Boost Converter [17]

Operasi keadaan *steadystate boost converter* [17]

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{opened} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{V_{dc}DT}{L} - \frac{(V_{dc}-V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (13)$$

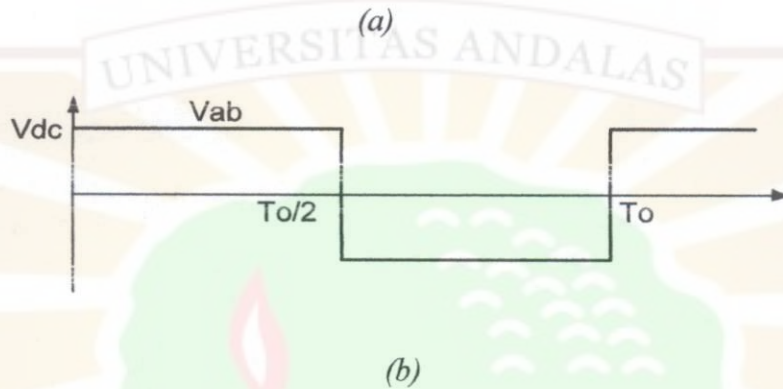
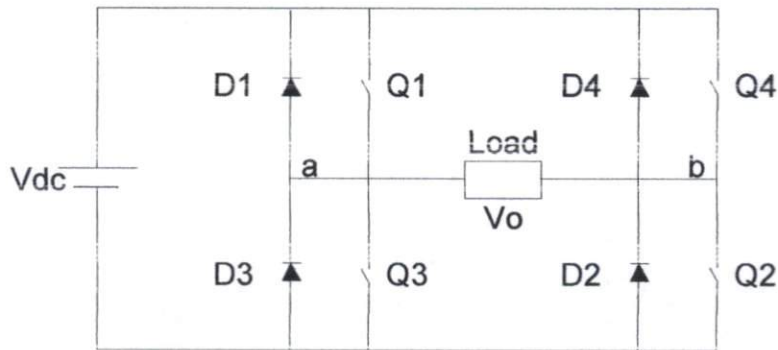
$$V_o = \frac{V_{dc}}{1-D} \quad (14)$$

$$V_{dc}I_L = \frac{\left(\frac{V_{dc}}{1-D}\right)^2}{R} = \frac{V_{dc}^2}{(1-D)^2 R} \quad (15)$$

Untuk meningkatkan efisiensi sistem *photovoltaic*, maka *photovoltaic* harus berada dititik operasi maksimum atau MPPnya, sehingga perlu untuk mengontrolnya. Pengontrolan ini perlu agar *photovoltaic* bekerja pada titik daya maksimumnya saat terjadi perubahan pada temperatur dan irradiasi matahari. Karena pada kondisi tersebut MPP *photovoltaic* akan bergeser dan berubah nilainya tergantung perubahan pada temperatur *junction* sel dan irradiasi.

### 2.3. Inverter Satu Fasa

Inverter satu fasa digunakan sebagai pengubah tegangan DC menjadi AC untuk pemenuhan beban dan penyambungan ke grid dengan menggunakan teknologi SPWM. Pengontrolan SPWM untuk mengatur tegangan keluaran agar memiliki frekuensi sesuai frekuensi fundamental beban. Bentuk gelombang tegangan *output* dapat dilihat dari gambar berikut :



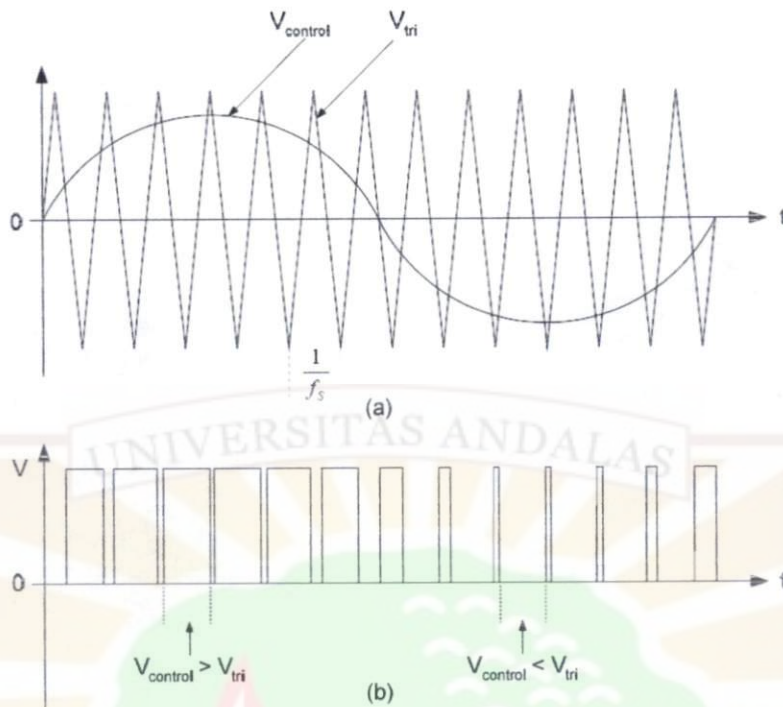
Gambar 2.5 (a) Inverter Jembatan Satu Fasa (b) Bentuk Gelombang Inverter Jembatan Satu Fasa [27]

Tegangan *output rms* dapat dicari dengan rumus berikut :

$$V_o = \left( \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T_o}{2}} V_{dc}^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} = V_{dc} \quad V_o = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} m_a \quad (16)$$

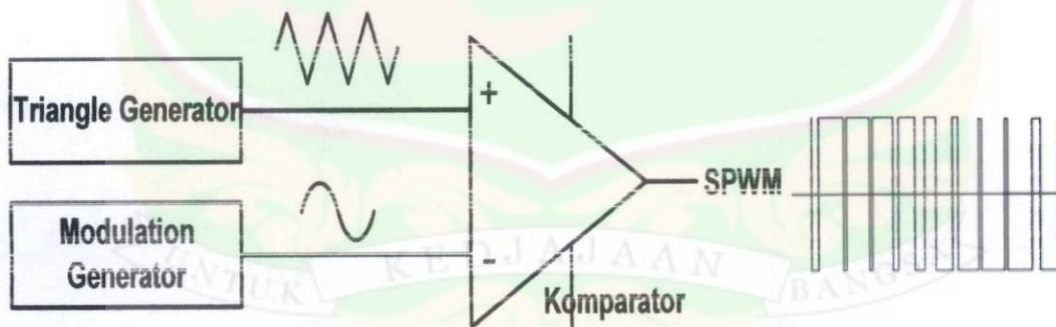
Pada rangkaian inverter, penggunaan modulasi lebar pulsa (*PWM, Pulse Width Modulation*) lebih kompleks, karena kita menginginkan keluaran inverter sinusoidal dengan *magnitude* dan frekuensinya dapat dikontrol. Untuk mendapatkan bentuk gelombang tegangan *output* sinusoidal sesuai dengan frekuensi yang diinginkan, sebuah sinyal kontrol sinusoidal pada frekuensi yang diinginkan dibandingkan dengan gelombang segitiga, seperti ditunjukkan pada gambar berikut [17][18] :





Gambar 2.6 Sinusoidal Pulse Width Modulation [27][18]

SPWM biasanya diaplikasikan pada inverter sebagai teknik *switching*-nya.



Gambar 2.7 Proses Pembentukan SPWM Menggunakan Komparator [27]

## 2.4. Tipe Sistem Photovoltaik (PV)

Konfigurasi pemasangan sistem *photovoltaic* sebagai energi terbarukan ada yang berdiri sendiri (*stand alone*) dan tersambung dengan jaringan konvensional (grid). Perkembangan teknologi untuk meningkatkan efisiensi dan optimalisasi sistem *photovoltaic* telah diteliti secara luas, baik melalui perbaruan topologi pemasangan maupun kontrol MPP (*Maksimum Power Point*) dan optimalisasi.

Adapun hal yang diperlukan untuk meningkatkan topologi elektronika daya untuk sistem terbarukan antaranya [18] [22]:

- Peningkatan konsumsi energi global
- Peningkatan kapasitas daya tetap
- Permintaan untuk energi bersih
- Cadangan bahan bakar fosil sangat tipis

Dan dalam hal ini, peran elektronika daya sangat besar. *Interface* elektronika daya dalam sistem *photovoltaic* sebagai energi terbarukan adalah:

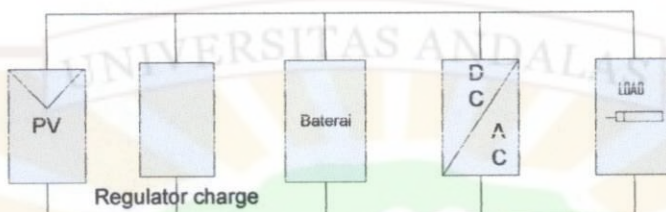
- Bagian penting untuk integrasi unit DG untuk mencapai efisiensi dan performa tinggi dalam sistem tenaga
- Tugas utama untuk konversi DC ke AC dan menaikkan tegangan jika diperlukan

### 2.4.1. Stand Alone

Sistem PV *stand alone* ditunjukkan pada gambar dibawah, digunakan pada area terpencil yang tidak ada akses jaringan grid. Sistem tenaga konvensional

digunakan di area terpencil sering berdasar kontrol manual generator diesel yang beroperasi secara kontinu atau untuk beberapa jam. Operasi generator diesel untuk level beban rendah secara signifikan meningkatkan biaya *maintenance* dan mengurangi usia pakai. Contoh aplikasi sistem PV *stand alone* adalah:

*Battery charging* dan pompa air solar



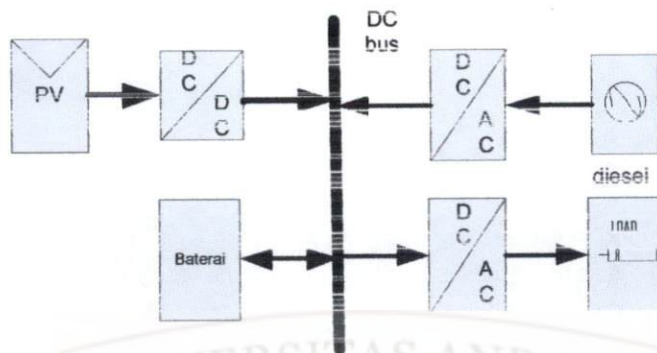
Gambar 2.8 Sistem PV Stand Alone [18]

#### 2.4.2. Hybrid

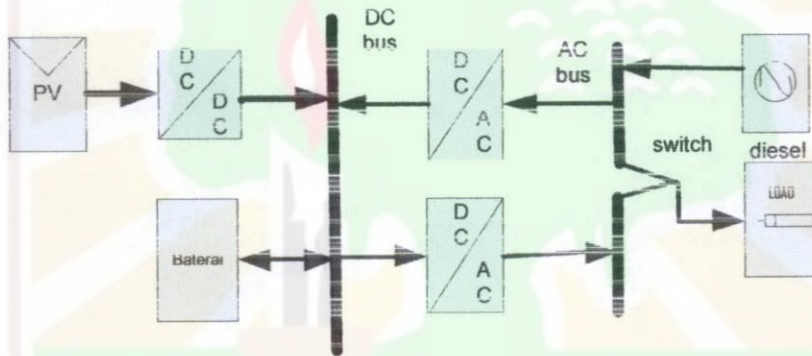
Sumber energi terbarukan seperti PV dapat ditambahkan pada sistem tenaga area terpencil yang menggunakan diesel dan bahan bakar fosil lainnya untuk energi generator untuk menyediakan daya 24 jam secara ekonomis dan efisien. Sistem ini disebut sistem energi *hybrid*. Sistem energi *hybrid* PV-diesel menghasilkan listrik AC dengan mengkombinasikan PV array dengan inverter, yang dapat beroperasi secara bergantian atau paralel dengan mesin penggerak generator konvensional. Sistem *hybrid* dapat diklasifikasikan dalam beberapa konfigurasi:

- Sistem energi *hybrid* seri
- Sistem energi *hybrid* switch
- Sistem energi *hybrid* paralel

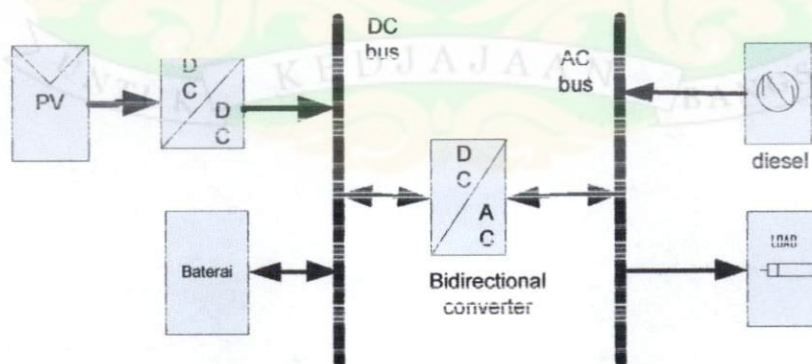




Gambar 2.9 Sistem Energi Hybrid Seri [18]



Gambar 2.10 Sistem Energi Hybrid Switch [18]



Gambar 2.11 Sistem Energi Hybrid Paralel [18]

### 2.4.3. *Grid Connected*

Dalam sistem PV tersambung grid, panel PV disambungkan ke grid melalui inverter tanpa baterai. Sistem ini dapat diklasifikasikan sebagai sistem yang kecil, seperti sistem atap rumah tinggal atau sistem tersambung grid besar. Grid yang berinteraktif dengan inverter arus sinkron dengan grid dalam tegangan dan frekuensi. Interaktif inverter dengan jaringan tidak hanya kondisi daya keluaran PV array tetapi diyakinkan bahwa keluaran sistem PV disinkronisasi dengan jaringan tenaga. Sistem ini dapat tanpa baterai atau dengan *back up* baterai. Sistem dengan baterai menyediakan keandalan suplai daya. Grid disambung dengan sistem PV adalah kekuatan bersama karena pola dorongan dan potongan yang bervariasi. Sistem ini memungkinkan pelanggan untuk melayani bebannya sendiri selama energi solar tersedia, dan tambahan energi dapat diinjeksikan ke grid dibawah pola *buy-back* energi untuk mengurangi biaya periode tersebut. Sistem PV tersambung grid dapat menjadi bagian dari sistem jaringan. Kontribusi daya solar tergantung ukuran sistem dan kurva beban rumah. Ketika sistem PV terintegrasi dengan jaringan grid, dua arah aliran daya akan dibangun. Jaringan grid akan menyerap kelebihan daya PV dan akan melayani rumah saat malam dan sesaat ketika daya PV tidak mencukupi. Perusahaan jaringan setuju dengan skema ini dibanyak bagian dunia. Sistem tersambung grid dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- Sistem PV tersambung grid aplikasi atap rumah
- Sistem jaringan skala luas



Untuk aplikasi PV rumah tangga, PV array atap rumah dapat menjadi pilihan. Solar sel menyediakan jalur bersih lingkungan dalam memproduksi listrik dan atap rumah selalu menjadi tempat ideal untuk PV array. Dengan penempatan PV array diatap, Daya solar dapat menyuplai beban rumah. Sistem PV atap dapat dibantu dalam mengurangi beban puncak musim panas untuk keuntungan perusahaan jaringan dengan melayani penerangan rumah tangga, pendinginan dan beban domestik lainnya. Baterai dapat meningkatkan keandalan sistem saat irradiansi rendah, malam hari atau saat berawan. Tetapi baterai menjadi pembawa masalah, seperti perbaikan dan biaya tinggi.

Untuk aplikasi atap terintegrasi, PV array dapat dipasang diatas atap atau langsung terintegrasi dalam atap. Jika atap terintegrasi, tidak diijinkan adanya saluran udara dibelakang modul PV untuk tujuan ventilasi, itu dapat meningkatkan temperatur sel selama operasi yang berakibat pada rugi-rugi energi. Kerugian aplikasi atap adalah orientasi PV array ditetapkan oleh atap. Dalam kasus ini, dimana orientasi atap berbeda dengan orientasi maksimum yang diperlukan sel, efisiensi keseluruhan sistem akan menjadi dibawah optimal.

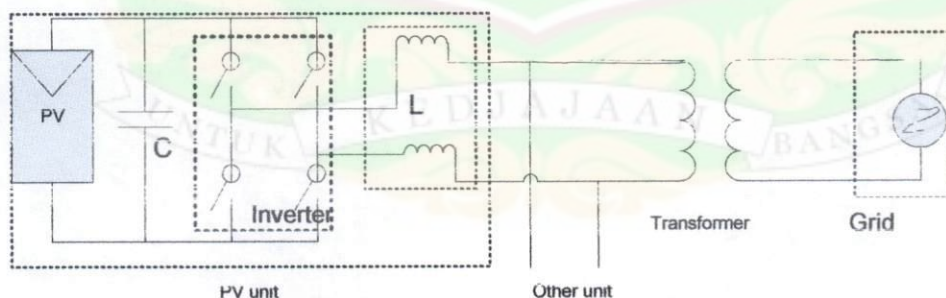
Sistem PV tersambung grid harus mencegah situasi *islanding*, ketika suplai jaringan gagal. Dalam kondisi *islanding*, pembangkit PV harus tidak terhubung dengan jaringan utama. PV dapat menyuplai beban local, jika PV tidak terhubung dengan jaringan. Jika grid terhubung kembali selama *islanding*, transien arus lebih dapat mengalir melalui inverter sistem PV, dan peralatan proteksi seperti CB akan rusak. Kontrol *islanding* dapat diterapkan pada inverter melalui jaringan distribusi. Kontrol inverter dapat didesain berdasar deteksi tegangan grid atau pengukuran impedansi, variasi frekuensi dan peningkatan



harmonisa. Proteksi harus didesign untuk islanding, hubung singkat, *over/under* tegangan dan arus, pentanahan dan petir.

Pembangkitan daya terpenting sistem PV tergantung waktu hari khususnya ketika jaringan dalam beban puncak. Pembangkit PV akan lebih cocok untuk kondisi puncak musim panas, tetapi itu tergantung kondisi iklim setempat. Pengguna PV dapat melayani beban mereka dengan manajemen beban untuk mendapatkan keuntungan maksimum pembangkit PV tersambung grid dan memberikan kelebihan daya pada grid saat beban puncak.

Kredit kapasitas yang ditetapkan adalah berdasarkan probabilitas statistic bahwa grid dapat memenuhi beban puncak. Faktor kapasitas selama puncak sama dengan pembangkit konvensional dan dapat diberikan untuk pembangkit PV, kecuali waktu ketika pembangkit PV terlalu banyak daya rendah, penyimpanan dibutuhkan. Dengan pembangunan pembangkit PV, tidak dibutuhkan lagi saluran transmisi dan distribusi ekstra. Pembangkit PV terdistribusi dapat juga berkontribusi dalam pengadaan daya reaktif pada grid dan mengurangi lingkup kompensator VAR.



Gambar2.12 Sistem PV dengan Interface Inverter Tersambung Grid [18]

Beberapa tipe inverter yang digunakan dalam aplikasi PV tersambung grid adalah:

- *Line-commutated inverter*
- *Self-commutated inverter*
- Inverter PV dengan transformator frekuensi tinggi

## 2.5. Topologi Sistem Photovoltaik Tersambung Grid

Struktur yang secara luas digunakan adalah berdasarkan hubungan langsung *battery bank* ke bus DC inverter terhubung grid. Akan tetapi penyimpanan secara alami daya output PV dan daya beban mempercepat untuk aksi *charge /discharge* baterai dan penuaan baterai cepat [23]. sehingga saat ini berkembang juga sistem tanpa baterai atau tanpa transformator [22]. Berikut beberapa topologi *photovoltaic* tersambung grid:

### 2.5.1. Topologi Sistem PV dengan Baterai

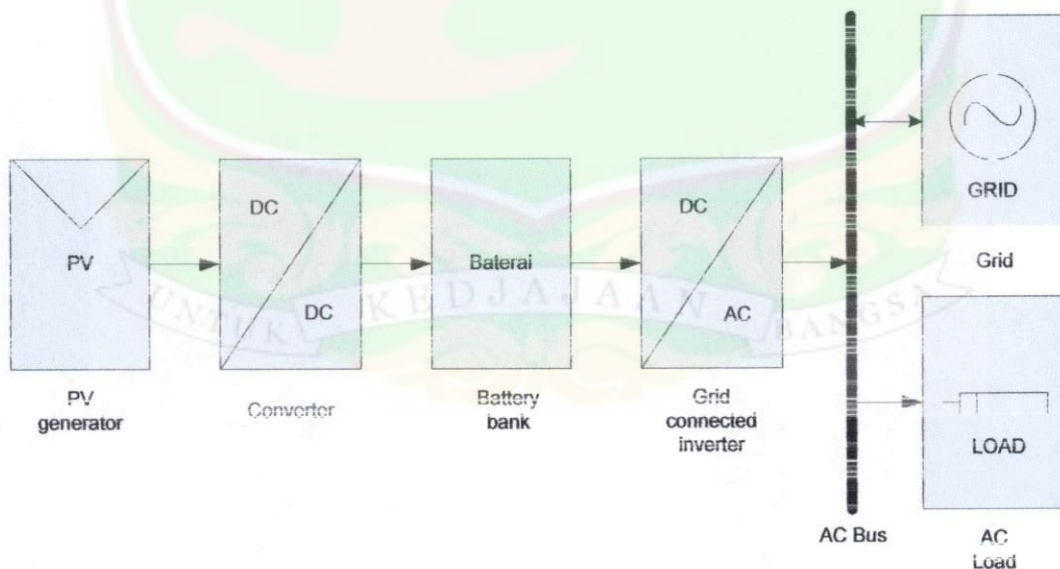
Sistem yang berkembang luas adalah sistem hubungan langsung *battery bank* ke bus DC inverter terhubung grid (lihat gambar 2.13). Kontrol PV digunakan untuk mendapatkan daya maksimum dari panel PV dan dikirim ke bank baterai. Akan tetapi penyimpanan secara alami daya output PV dan daya beban mempercepat untuk aksi *charge /discharge* baterai dan mempercepat penuaan baterai.

Untuk memperoleh efisiensi lebih penggunaan baterai, *DC coupled Structure* dikembangkan. Baterai bank dihubungkan ke bus DC melalui *DC-DC*



*converter*, sehingga memungkinkan untuk optimasi mode operasi *charge/discharge* (lihat gambar 2.14 ). Keuntungan kedua adalah bank super kapasitor ditambahkan dan juga terhubung dengan bus DC melalui DC-DC konverter. Baterai harus digunakan untuk pasokan energi jangka panjang. Super kapasitor memudahkan untuk regulasi dinamik cepat dari daya. Manajemen daya dan metode kontrol untuk generator PV tersambung grid ini termasuk kedua unit *storage* harus didesain untuk menyediakan referensi daya aktif grid yang dibutuhkan. Nilai keseluruhan sistem dapat jadi meningkat lebih besar untuk operator grid karena generator ini dapat menyediakan daya aktif dan reaktif yang ditentukan.. Tambahannya, strategi kontrol untuk *charger* baterai diperlukan untuk menjamin SOC baterai tinggi dan keamanan *overcharge*, sebaik peningkatan usia baterai.

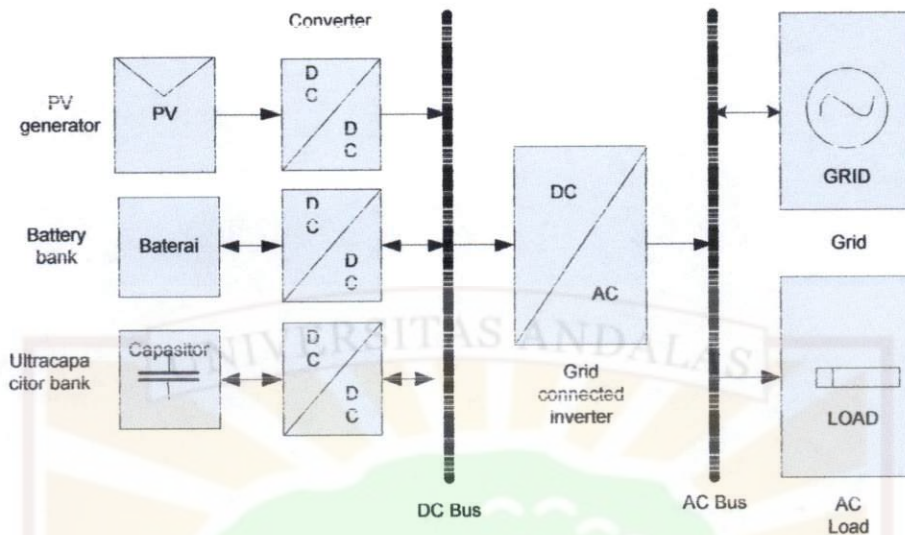
a. *Cascade couple structure*



Gambar2.13 Topologi Cascade Couple Structure [23]



b. *DC couple structure*

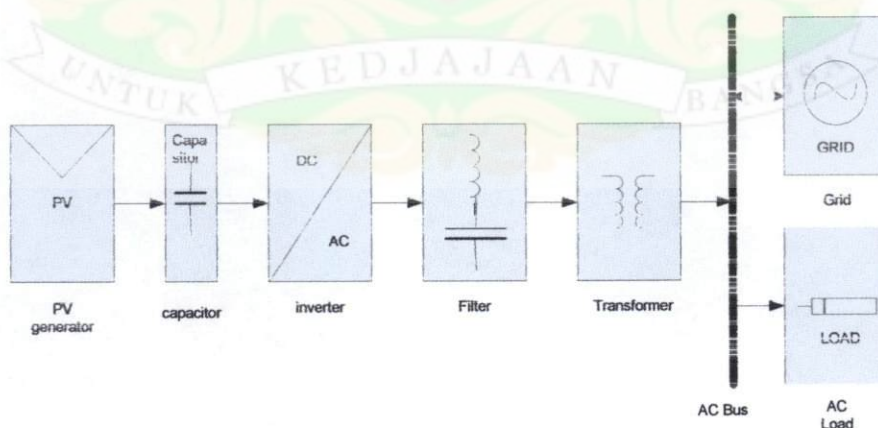


*Gambar 2.14 Topologi DC Couple Structure [23]*

## 2.5.2. Topologi Sistem PV Tanpa Baterai

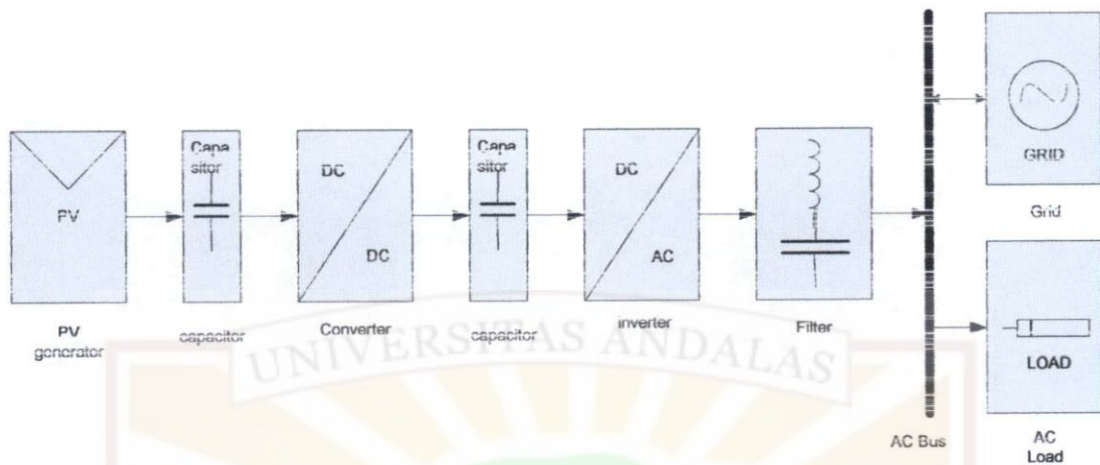
Ada dua tipe sistem penyambungan sistem *photovoltaic* dengan grid yaitu konfigurasi transformator frekuensi saluran dan konfigurasi tanpa transformator dengan converter penstabil dan penaik DC/DC [18] [22].

a. Dengan transformator



*Gambar 2.15 Topologi Dengan Transformator [22]*

b. Tanpa transformator

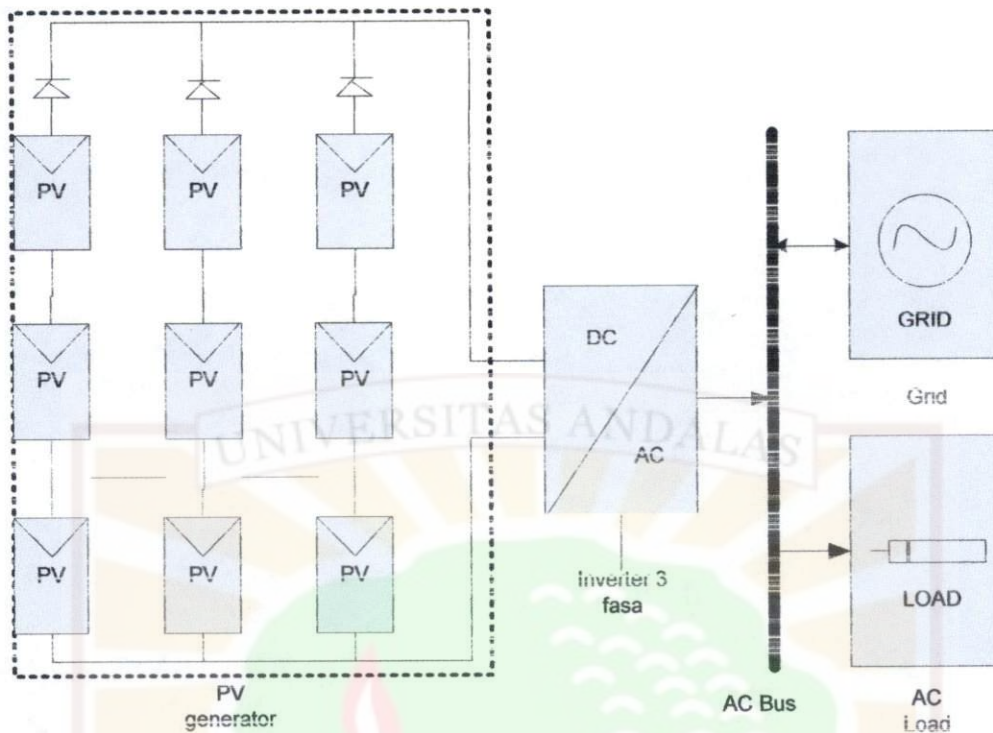


Gambar 2.16 Topologi Tanpa Transformator [22]

### 2.5.3. Beberapa Sistem Topologi Converter

#### a. Inverter Terpusat

Sistem inverter terpusat diaplikasikan pada sistem PV tiga fasa dengan rentang daya mulai dari 10kW. Panel PV terhubung ke bus DC inverter. Untuk menghindari penggunaan *boost converter* dan transformator dibutuhkan tegangan cukup tinggi. Sehingga untuk aplikasi daya besar (MW) beberapa inverter dihubung paralel. Sistem ini juga menghasilkan rugi-rugi daya yang tinggi.

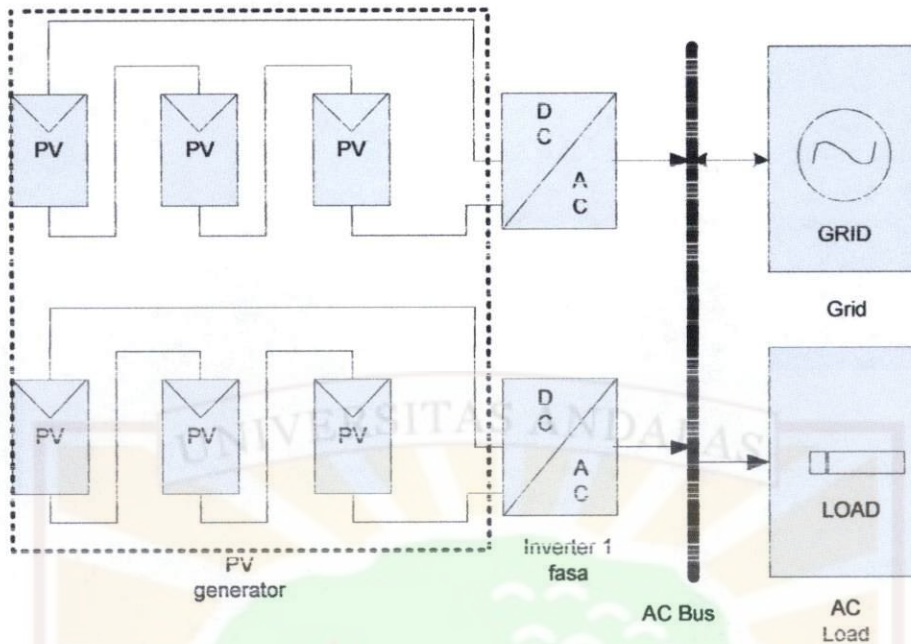


Gambar 2.17 Topologi Inverter Terpusat (Centralized) [22]

#### b. String Inverter

Topologi *string* sering diaplikasikan dalam lingkungan kecil dengan rentang daya dari 0.5kW hingga 1kW. Setiap string terhubung dengan sebuah inverter dan fasilitas MPPT. Konfigurasi system sangat fleksibel dan memiliki orientasi ruang yang berbeda. Untuk peningkatan keandalan sistem beberapa inverter bekerja secara paralel.

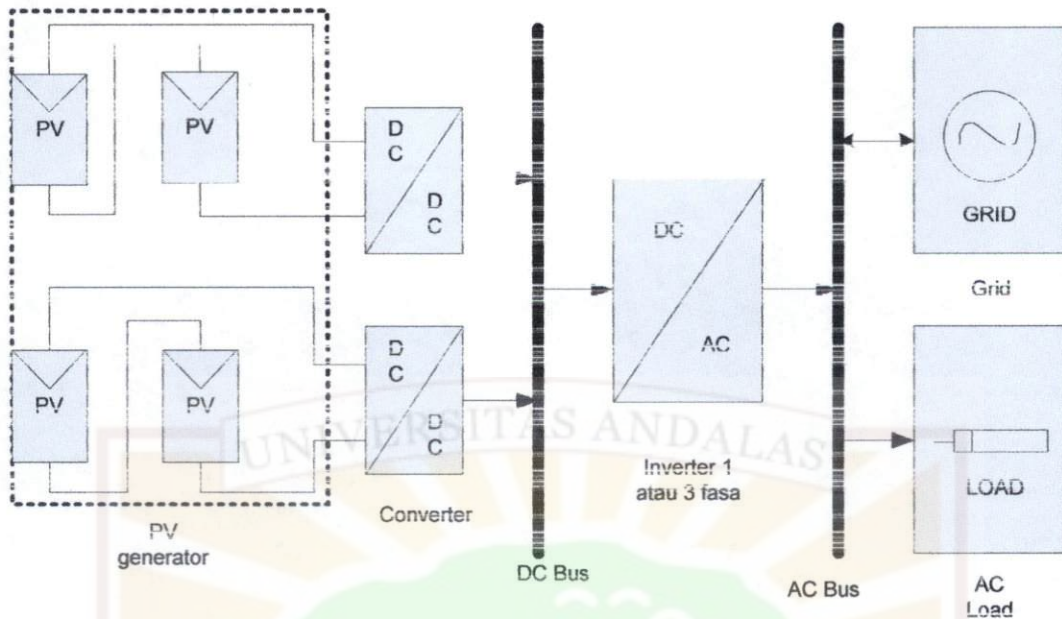




*Gambar 2.18 Topologi Inverter String [22]*

### c. Multi String Inverter

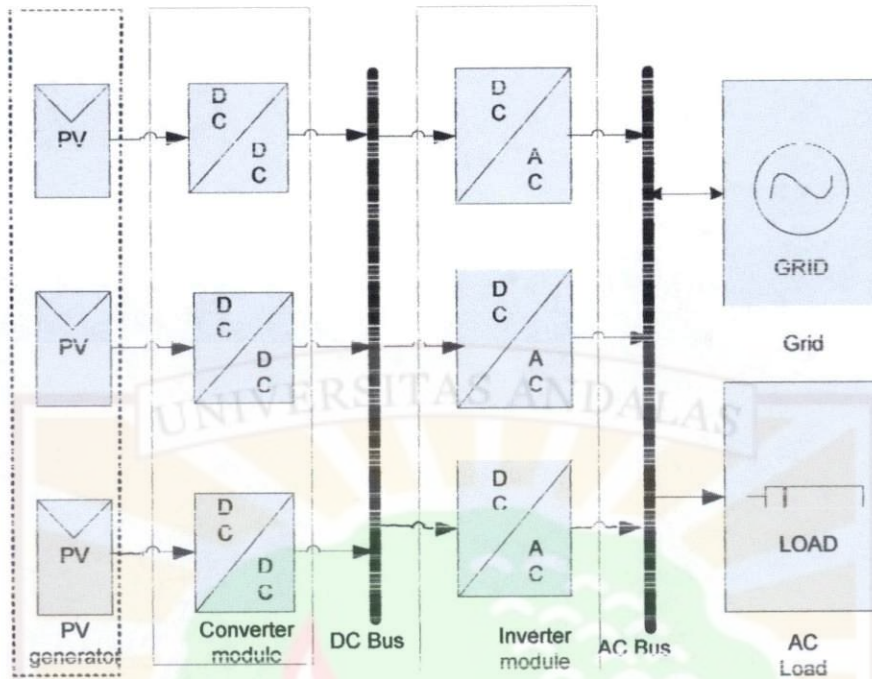
Multi string adalah perkembangan lanjut dari sebelumnya. Tiap string terhubung sendiri dengan DC-DC converter dan kemudian bersama terhubung dengan inverter. Penggunaan converter DC masing-masing memudahkan perluasan lanjut dari pembangkit PV dan pemakaian bersama inverter dapat mengurangi rugi-rugi daya.



*Gambar 2.19 Topologi Inverter Multi String [22]*

#### **d. Topologi Kompleks**

Topologi ini diaplikasikan pada perumahan skala kecil dengan modul *DC-DC converter* dan inverter. Bus DC bekerja sebagai pembawa bersama arus secara paralel dan operasi berlebih inverter didapat tanpa link komunikasi antara mereka. Dimana tiap unit modul merupakan fungsi independen. Topologi ini memberikan efisiensi tinggi dan desain yang fleksibel.

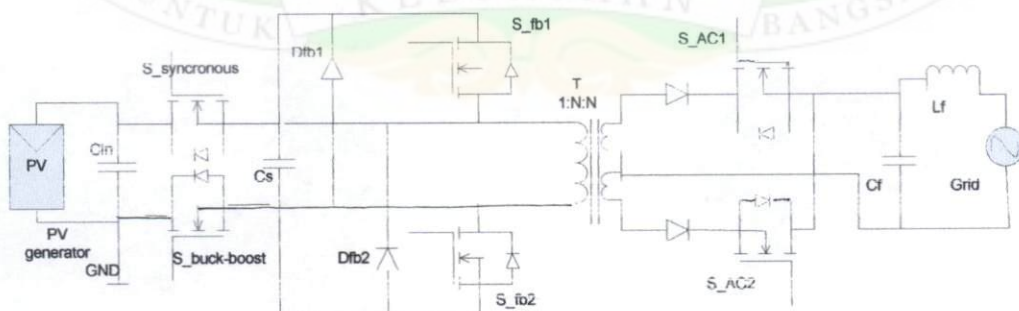


Gambar 2.20 Topologi Inverter Kompleks [22]

#### e. Inverter PWM Sumber Tegangan Terhubung Grid /DC

##### (1) Topologi Inverter Fly-Back

Topologi ini terdiri dari konverter *buck-boost*, konverter *fly-back*, transformator bersama dan *cyclo converter* pada keluarannya dan termasuk topologi dengan jumlah komponen yang rendah.

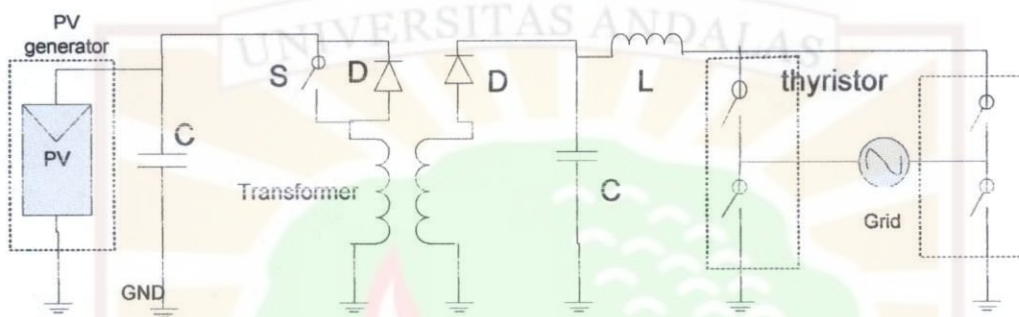


Gambar 2.21 Topologi Inverter Flyback [22]



## (2) Topologi Inverter Fly-Back Current Fed

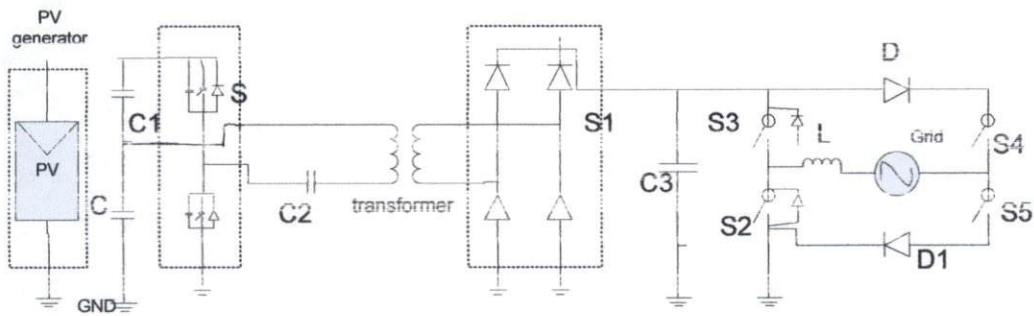
Topologi ini menyediakan keluaran arus bentuk sinus disearahkan dengan menjaga tegangan MPPT PV. Dimana arus dalam *fly-back* bersifat *discontinue*. Untuk mengatasi ripple frekuensi tinggi dan rendah digunakan kapasitor buffer. Inverter grid dapat diimplementasikan dengan *thyristor*.



Gambar 2.22 Topologi Inverter Flyback Current Fed [22]

## (3) Konverter DC/DC Resonansi Seri dan Konverter Terhubung Jembatan Grid

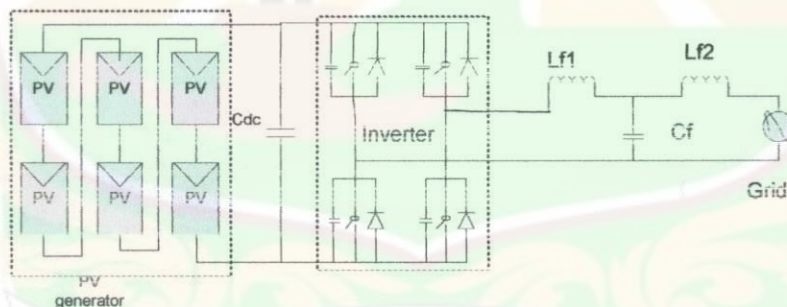
Penggunaan inverter yang dimodifikasi dengan penambahan 2 dioda. konverter DC/DC dengan ratio transfer tegangan tetap. Konverter ini memiliki *losses switching* yang rendah. Inverter grid bekerja pada frekuensi switching rendah dan tinggi dengan control terpisah. Lengan kiri dikontrol dengan kontrol band hysteresis, operasi pada 20-80kHz. Lengan kanan dikontrol berdasar polaritas tegangan grid, frekuensi *switching* grid.



Gambar 2.23 Topologi Converter DC/DC Resonansi Seri Dan Converter Terhubung Jembatan Grid [22]

### (1) Topologi Single Stage Untuk Multiple Module

Topologi *single stage* terdiri atas inverter PWM sumber tegangan dan filter LCL dengan efisiensi tinggi hingga 97%. *Losses* daya tinggi hanya selama *partial shading*, semua modul terhubung pada peralatan MPPT yang sama. Interface sistem PV dengan grid menggunakan kapasitor besar.

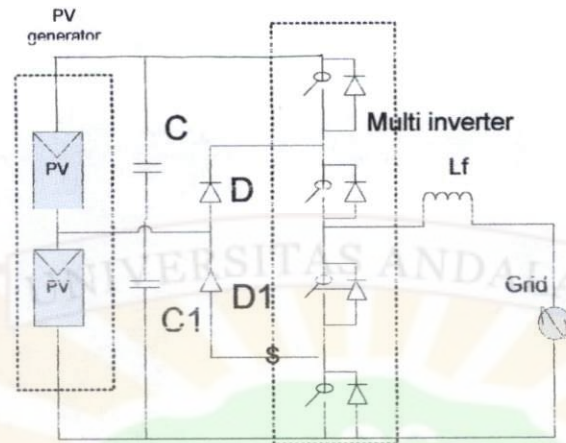


Gambar 2.24 Topologi Single Stage Multiple Module [22]

### (2) Topologi Diode Clampe Setengah Jembatan Tiga Level (Half Bridge Diode Clamped Three Level)

Pada topologi ini, inverter 3 level dapat dikembangkan jadi 5,7 dan lebih level, dengan menambahkan beberapa modul dan *switch*. Keuntungannya adalah kemungkinan pengurangan distorsi harmonisa. Tetapi topologi ini memerlukan

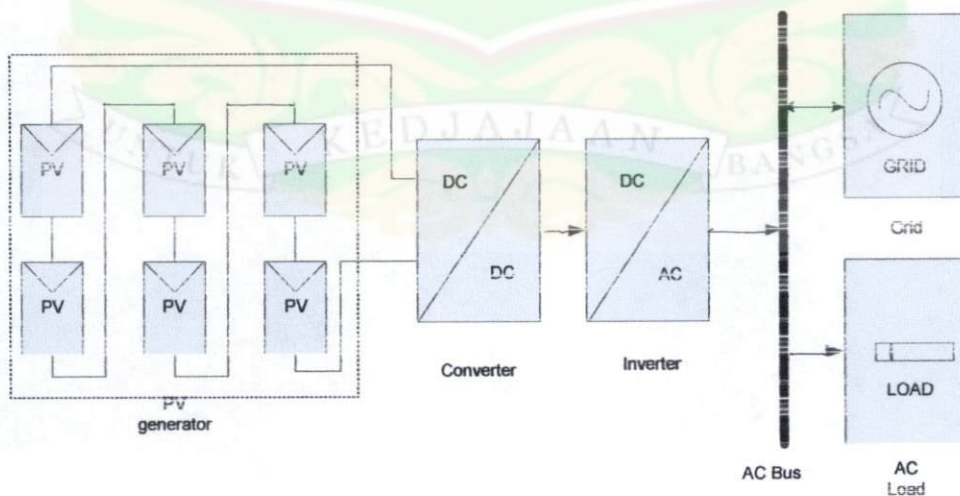
semikonduktor dengan jumlah yang banyak. Beban tak seimbang pada string berbeda.



Gambar 2.25 Topologi Diode Clampe Setengah Jembatan [22]

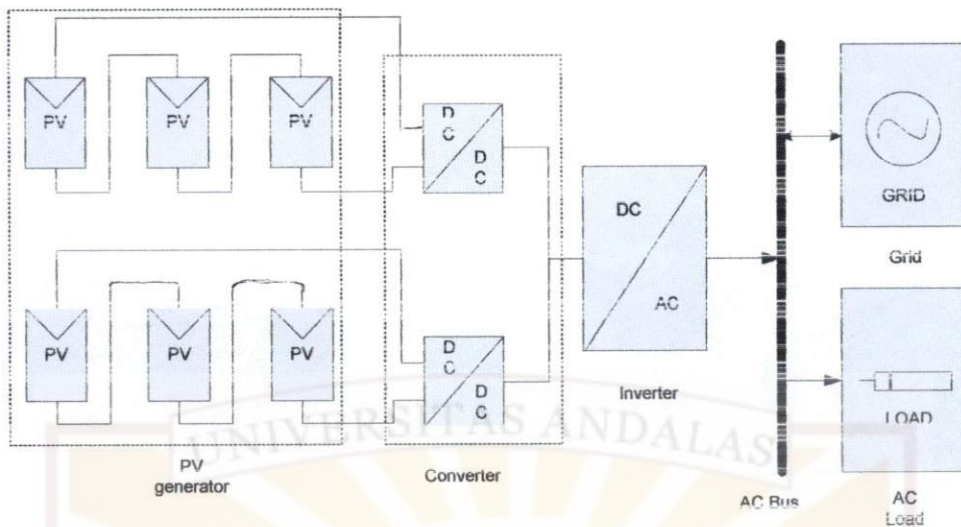
### (3) Topologi 2 Stage Untuk Multiple Module

Untuk multiple modul dapat direalisasikan dengan menghubungkan seri modul seperti untuk topologi 2 stage untuk single modul. Konverter DC/DC dipisah untuk tiap *string module* dengan pemakaian bersama inverter DC/AC.



(a)





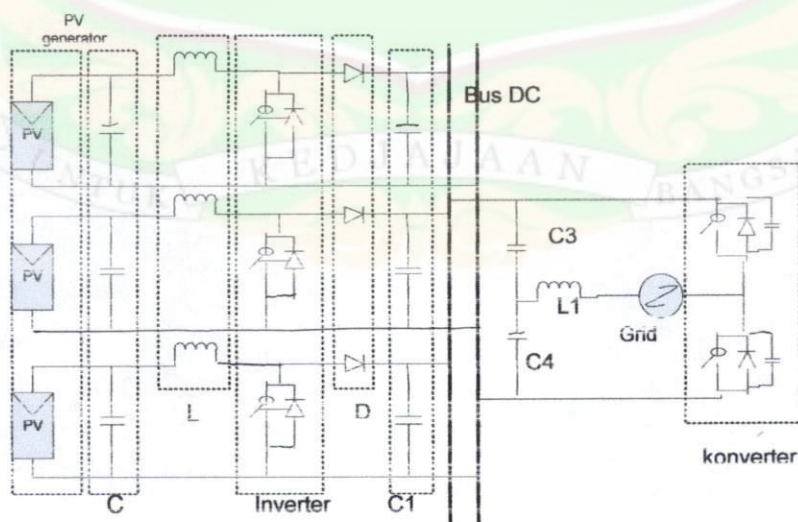
(b)

Gambar 2.26 Topologi 2 Stage Multiple Module (a) Module Dipasang Seri

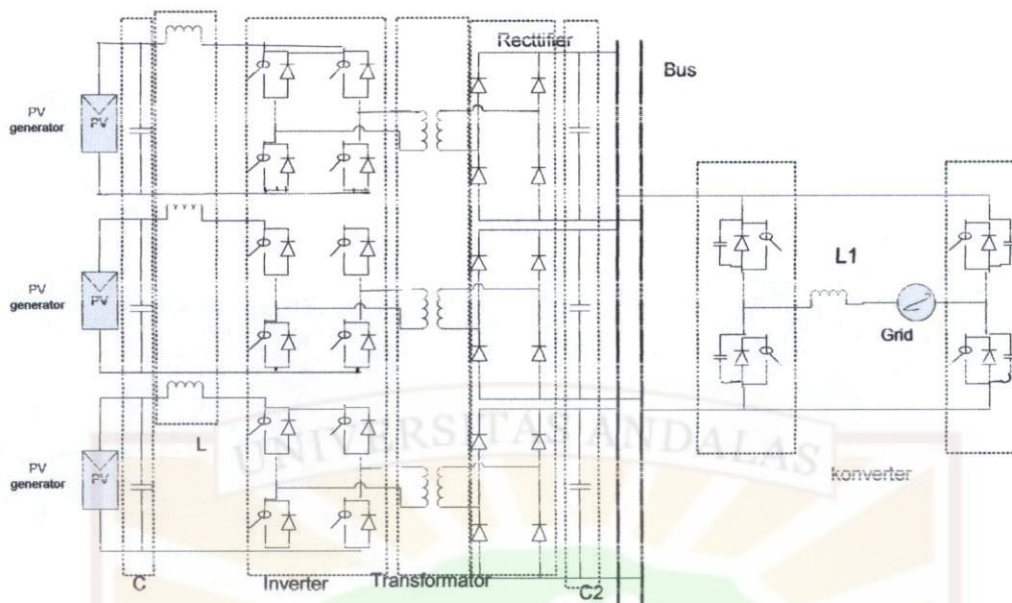
(b) Konverter DC Terpisah Tiap Module [22]

#### (4) Topologi Multi String

Inverter yang digunakan adalah inverter setengah jembatan bersama. Tetapi rangkaian juga dapat direalisasikan dengan *galvanic isolated push-pull* atau konverter jembatan penuh.



(a)



(b)

Gambar 2.27 Topologi Multistring (a) Setengah Jembatan Bersama (b) Converter Jembatan Penuh [22]

## 2.6. Pengontrolan MPPT Sistem *Photovoltaic* [24] [25]

### 2.6.1. Metode Perturb dan Observe (P&O)

Metode ini juga dikenal dengan metode perturbation (*hill climbing*) [25], paling banyak digunakan algoritma MPPT dalam produk PV komersial. Ini pada dasarnya metode trial and error. Pengontrolan PV meningkatkan referensi untuk daya keluaran inverter dengan kuantitas kecil dan kemudian deteksi daya keluaran actual. Jika daya keluaran turun dinaikkan, ia akan menaikkan lagi hingga daya *output* mulai turun, pada pengontrol penurunan referensi untuk mencegah collapse keluaran PV harus karakteristik PV *non linear* secara tinggi. Meskipun algoritma P&O mudah diimplementasikan, ia memiliki beberapa masalah, termasuk [24]:



- a. Sistem PV tidak bisa selalu beroperasi pada MPP pada proses yang lambat dan demikian energi solar dari PV array tidak penuh digunakan
- b. Sistem PV mungkin selalu beroperasi dalam mode peristiwa osilasi dengan kondisi sinar matahari konstan, memicu fluktuasi keluaran inverter
- c. Operasi sistem PV bisa gagal untuk menjajak MPP selama perubahan mendadak sinar matahari.

### 2.6.2. Metode Rangkaian Open dan Short [24]

Metode ini untuk kontrol MPPT berdasarkan pengukuran arus dan tegangan terminal PV array. Dengan mengukur tegangan open dan arus short dalam realtime, MPP PV array dapat ditentukan dengan pendefinisian kurva IV PV. Fitur metode ini merespon relatif cepat dan tidak menyebabkan osilasi dalam *steady state*. Meskipun, metode ini tidak dapat selalu menghasilkan daya maksimum yang tersedia dari PV array karena menggunakan definisi kurva PV yang sering tidak reflek secara efektif pada situasi *realtime* karena karakteristik PV *nonlinear* dan kondisi cuaca. Juga pengukuran *online* tegangan open dan arus *short* menyebabkan pengurangan *output*.

### 2.6.3. Algoritma Konduktansi *Incremental*

Tugas utama algoritma konduktansi *incremental* adalah mendapatkan turunan daya keluaran PV dengan mengenai tegangan keluarannya, yaitu  $dP/dV$  [24]. Daya keluaran PV maksimum dapat dicapai ketika  $dP/dV$  mendekati nol. Pengontrol menghitung  $dP/dV$  berdasarkan pengukuran tegangan dan daya keluaran *incremental* PV [25]. Jika  $dP/dV$  tidak dekat nol. Pengontrol akan



mengatur tegangan PV bertahap hingga  $dP/dV$  mendekati nol, dimana PV array pada keluaran maksimum. Keuntungan utama algoritma dibandingkan dengan metode P&O adalah proses tracking daya cepat. Meskipun ia memiliki kerugian mungkin output tidak stabil dibawah irradiasi level rendah menjadi sulit dan hasil tak memuaskan [25].

#### 2.6.4. Algoritma Fuzzy Logic dan Lainnya

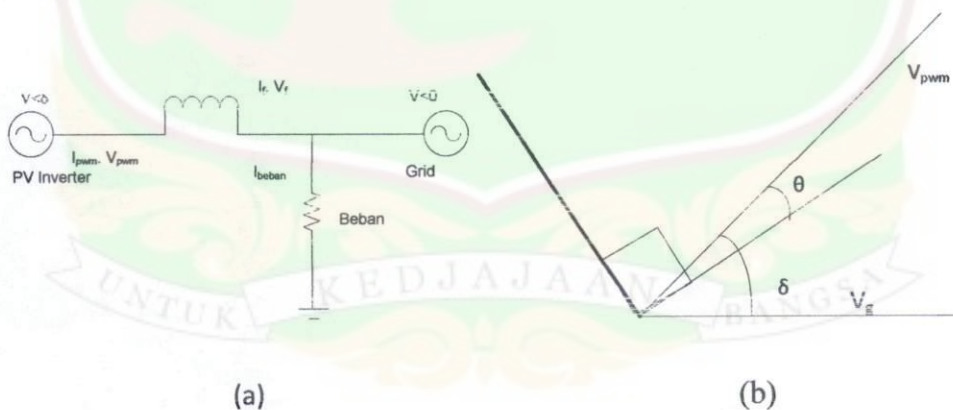
Sejak sifat PV array memiliki karakteristik IV dan PV *non linear*, MPP bervariasi dengan irradiasi dan temperatur. Beberapa algoritma seperti *fuzzy logic* atau kontrol ANN dengan *adaptive* dan *non linear* secara alami disesuaikan dengan kontrol PV. Dengan dasar pengetahuan *rule fuzzy*, kontrol fuzzy dapat *mentrack* MPP. Kontrol NN beroperasi seperti model *black box*, diperlukan informasi yang tak detail tentang sistem PV. Setelah mempelajari hubungan antara tegangan MPP dan tegangan *open* atau irradiasi dan temperatur [25], kontrol NN dapat *mentrack* MPP *online*. Kerugian kontrol adalah biaya implementasi tinggi untuk algoritma kompleks yang biasanya butuh DSP untuk *computing platform* [24].

#### 2.7. Optimalisasi Sistem Photovoltaik Tersambung Grid [18] [26]

Inverter PV dihubungkan melalui sebuah transformator dengan impedansi ekuivalen  $L$  pada titik PCC. Keluaran inverter yaitu fasa dan magnitude tegangannya dikontrol untuk mengatur daya aktif dan reaktif inverter PV yang disuplai ke grid. Daya real inverter PV sama dengan daya keluaran PV array

dikurangi rugi-rugi inverter karena keseimbangan energi antara input DC dan output AC inverter PV [26]. Dan daya keluaran rata-rata inverter PV ke grid dijelaskan oleh persamaan dibawah. Dari persamaan tersebut tegangan keluaran Inverter PV dapat dikontrol.

Sistem kontrol ini dapat secara sistem analog atau dengan mikroprosesor. Sistem kontrol ini menghasilkan bentuk gelombang dan regulasi amplitudo dan fasa bentuk gelombang untuk mengontrol aliran daya antara inverter dan grid. Grid yang diinterfacekan dengan PV inverter, tegangan terkontrol atau arus terkontrol, memiliki potensial aliran daya *bidirectional*. Tidak hanya menyuplai beban lokal, tetapi juga dapat mengeksport kelebihan daya aktif dan reaktif ke grid. Pendekatan pengontrol diperlukan untuk mengurangi beberapa error dalam pengiriman daya karena error sinkronisasi, yang dapat membuat inverter *overload* [18]. Interface sederhana inverter tersambung grid dengan filter orde satu dapat ditunjukkan oleh gambar berikut;



Gambar 2.28 (a) Interface Sistem Grid Sederhana (b) Diagram Fasor Grid  
Tersambung PV [18]

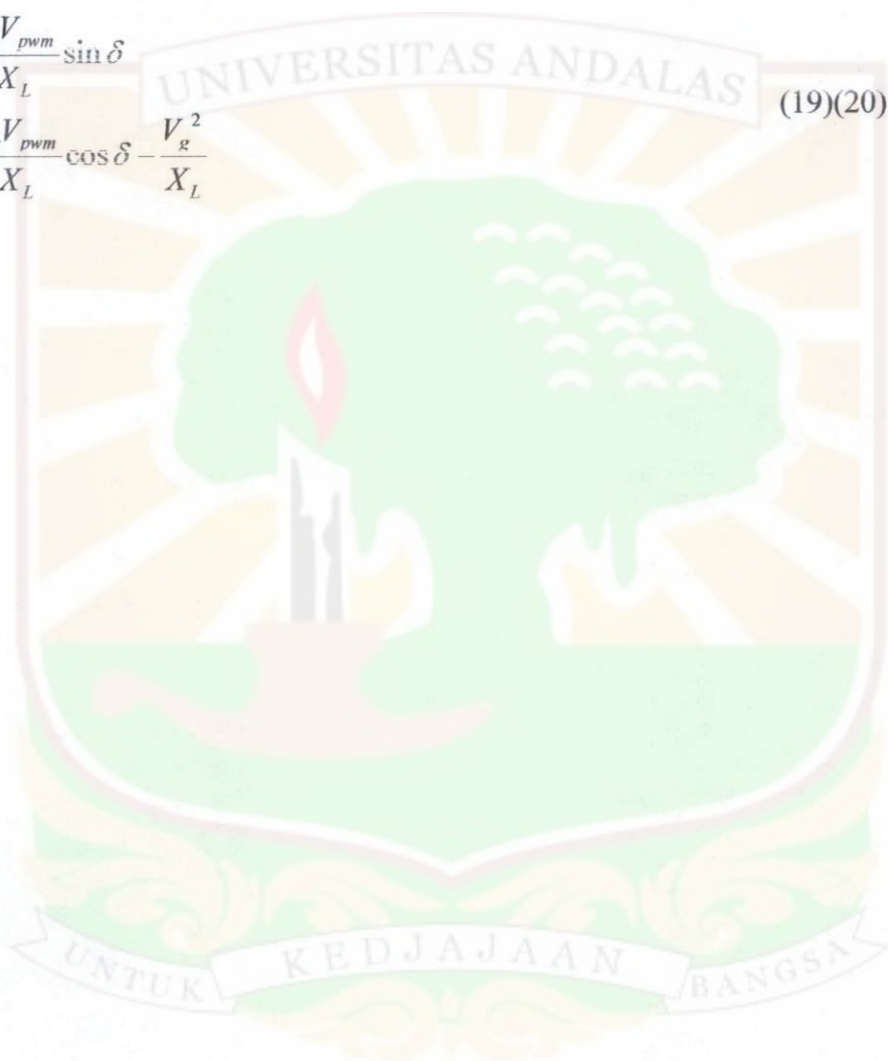
Dengan keluaran inverter dipengaruhi oleh indeks modulasi sesuai persamaan (16).

$$S = P + jQ$$

$$S = \frac{V_g V_{pwm}}{X_L} \sin \delta + j \left[ \frac{V_g V_{pwm}}{X_L} \cos \delta - \frac{V_g^2}{X_L} \right] \quad (17)(18)$$

$$P = \frac{V_g V_{pwm}}{X_L} \sin \delta$$

$$Q = \frac{V_g V_{pwm}}{X_L} \cos \delta - \frac{V_g^2}{X_L} \quad (19)(20)$$

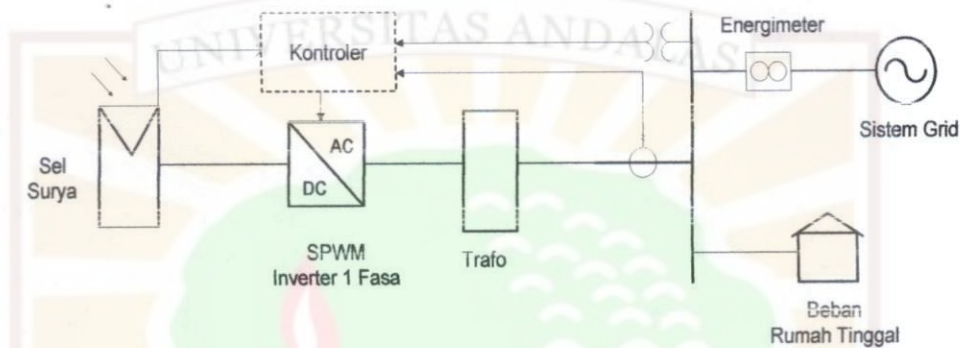




## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1. Model Rancangan Sistem PLTS Tersambung ke Grid Pada Rumah Tinggal

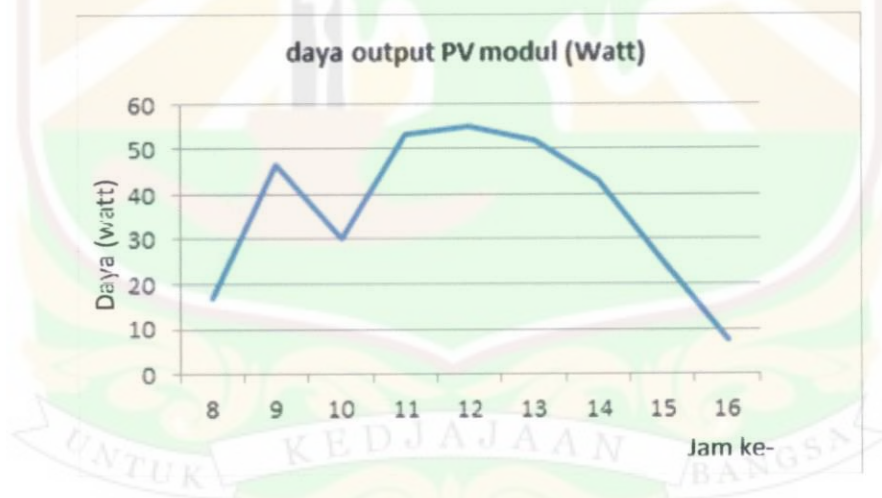


*Gambar 3.1. Pemodelan PLTS Tersambung Ke Sistem Grid Pada Rumah Tinggal*

Sistem PLTS pada rumah tinggal yang tersambung grid didesain menggunakan rangkaian seperti Gambar 3.1. Pengontrolan dilakukan agar akumulasi energi yang diserap dari grid dalam rentang waktu tertentu adalah nol. Dengan mengetahui pola karakteristik keluaran sistem PLTS dan beban rumah maka dapat diperhitungkan pengontrolan agar nilai total daya PLTS dapat memenuhi beban dalam periode tertentu, sehingga hanya terjadi peminjaman/penyimpanan sementara energi listrik pada sistem grid. Pada saat cuaca tidak menguntungkan atau hujan maka daya yang dibangkitkan oleh PLTS kecil sehingga tidak menutupi kebutuhan beban saat itu, tetapi saat cuaca cerah dan radiasi matahari tinggi sehingga keluaran PLTS pada kondisi maksimum dan

itu melebihi dari nilai beban rumah, maka daya berlebih disalurkan ke grid. Besarnya daya yang dipasok dari grid untuk beban rumah dan besarnya daya yang diberikan sistem PLTS ke grid tersebut yang dikontrol agar bernilai total sama dalam periode tertentu.

Dalam sistem ini digunakan modul surya 60W peak sebanyak 5 buah. Dan direncanakan memasok sebuah rumah tinggal dengan daya terpasang 450VA.[14] Telah melakukan pengujian karakteristik dari satu modul *PV* dalam keadaan cuaca cerah di Fakultas Teknik Unand. Pengukuran dilakukan dengan tracking dan non tracking, untuk rumah biasanya digunakan sistem non tracking yang hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 3.2. Keluaran untuk satu modul *PV* dalam sehari mencapai 330.653Wh.

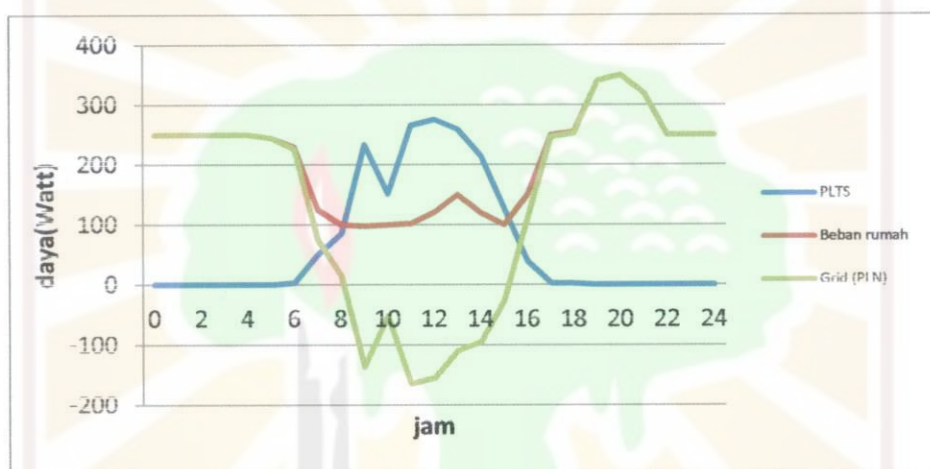


Gambar 3.2. Daya Keluaran Modul *PV* Saat Cuaca Cerah

Dari data tersebut dapat diperkirakan bahwa keluaran PLTS saat cuaca cerah untuk 10 modul adalah  $10 \times 330.653\text{Wh} = 3306.53 \text{ Wh}$ . Keluaran PLTS

saat cuaca cerah dapat melebihi beban rumah yang digunakan saat itu. Sehingga ada penyaluran energi dari PLTS saat siang hari ke grid.

Pola beban rumah [15] juga harus diketahui dalam pengontrolan ini sehingga dapat dihitung energi yang dipasok dari grid dengan menghitung selisih beban dengan keluaran PLTS. Berikut adalah asumsi kurva beban sebuah rumah 450VA dan kurva daya PLTS dan grid.



*Gambar.3.3 Pola Aliran Daya Sistem PLTS Terhubung Grid Pada Rumah Tinggal*

Kurva tersebut sebagai dasar perhitungan dilakukannya pengontrolan agar nilai daya yang disuplai oleh PLTS sama dengan daya yang dibutuhkan oleh beban. Pemakaian energi dalam periode tertentu tertutupi oleh energi yang dibangkitkan PLTS. Sehingga energi yang disuplai oleh grid ke beban adalah nol atau mendekati nol.



### 3.2. Pemodelan Simulasi Rancangan Sistem PLTS Tersambung ke Grid Pada Rumah Tinggal

Pemodelan sistem PLTS tersambung grid menggunakan simulink MATLAB. Blok model sistem PLTS berdasarkan persamaan terkait rangkaian ekivalen sel surya. Modul sel surya yang dimodelkan adalah tipe SHARP ND T060M1. Modul ini berdasarkan teknologi sel surya silicon Kristal. Modul ini dapat untuk berdiri sendiri dan cocok untuk disambung dengan grid. Adapun spesifikasi dan karakteristik elektriknya adalah seperti pada tabel dibawah [16].

*Tabel 3.1. Spesifikasi SHARP ND T060M1*

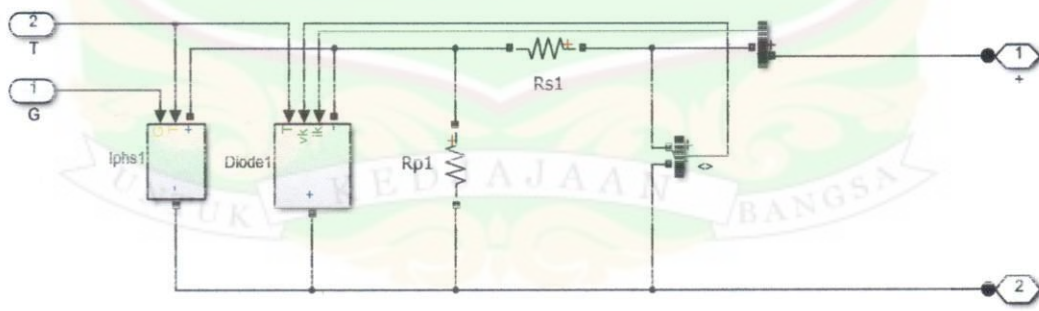
Cell	Poly-crystalline silicon solar cells
No. of cells and connections	36 in series
Application	DC 12V sistem
Maximum sistem voltage	DC 600V
Maximum power	60W
Dimensions	787x671x46
Weight	7.5 kg

Tabel 3.2. Electro Optical Characteristic SHARP ND T060M1

Model	ND-T060M1				
Parameters	Symbol.	Min	Typ.	Unit	Condition
Open circuit voltage	$V_{oc}$	—	22.0	V	Irradiance: 1000 W/m <sup>2</sup>
Maximum power voltage	$V_{pm}$	—	17.4	V	
Short circuit current	$I_{sc}$	—	3.90	A	
Maximum power current	$I_{pm}$	—	3.45	A	Module temperatur: 25°C
Maximum power	$P_m$	57	60	W	
Module efficiency	$\eta_m$	—	11.36	%	

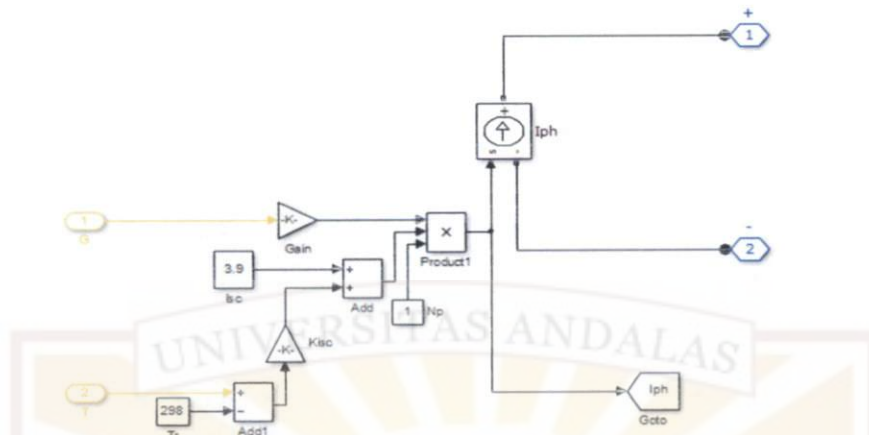
### 3.2.1 Pemodelan Panel Surya

Pemodelan panel surya dalam simulasi MATLAB dimodelkan berdasarkan rangkaian ekivalen sel surya sesuai Gambar 2.1. Dengan pemodelan komponen  $I_{ph}$  dan diode sebagai sumber arus DC terkontrol.



Gambar 3.4 Rangkaian Model Simulink Panel Surya

### 3.2.1.1. Pemodelan $I_{ph}$



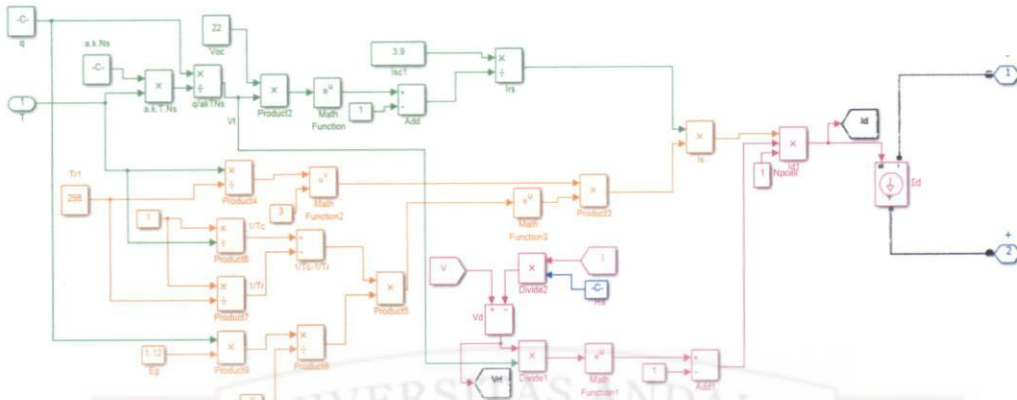
Gambar 3.5 Model Simulink Persamaan Pengganti  $I_{ph}$

Sumber pembangkit *photovoltaic* diekivalenkan sebagai sumber arus DC terkontrol. Maka model  $I_{ph}$  dibangun menggunakan sumber arus DC terkontrol. Dimana kontrol arus berdasarkan persamaan (5). Dengan input bebas irradiansi dan temperatur sel.

### 3.2.1.2. Pemodelan $I_d$

Untuk pemodelan diode juga sama halnya dengan pemodelan sumber  $I_{ph}$ , menggunakan sumber arus DC terkontrol dengan input bebas irradiansi dan temperatur sel. Pengontrolan arus berdasarkan persamaan (6) dengan menggunakan parameter datasheet panel surya.

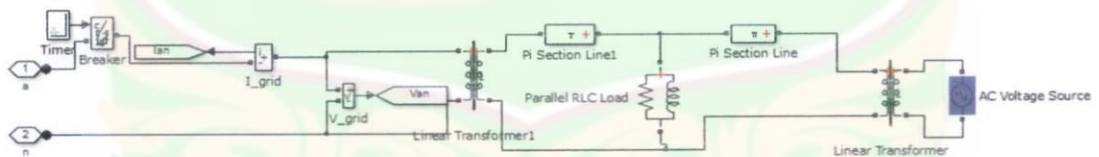




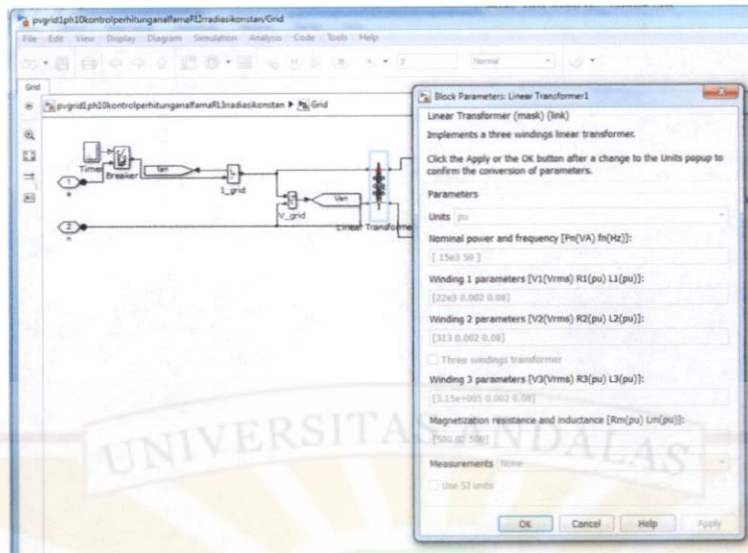
Gambar 3.6 Model Simulink Persamaan Pengganti  $I_d$

### 3.2.2. Pemodelan Grid

Grid dimodelkan berdasarkan *single line* sistem tenaga secara umum, dimana terdiri dari sumber pembangkit, transformator penaik tegangan, beban primer, dan transformator penurun tegangan. Adapun rangkaian model grid pada gambar dibawah.



(a)

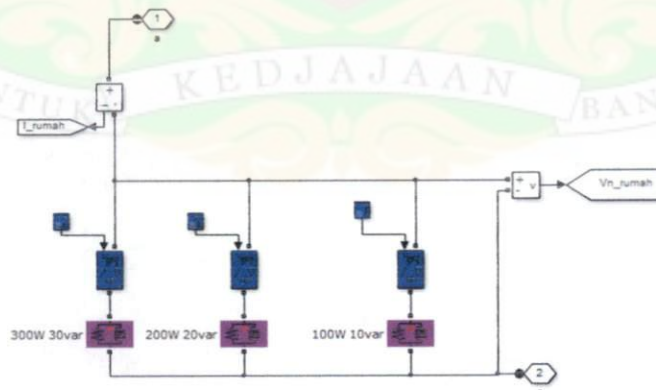


(b)

Gambar 3.7 (a) Model Simulink Sistem Grid (b) Blok Parameter Transformator Sistem Grid

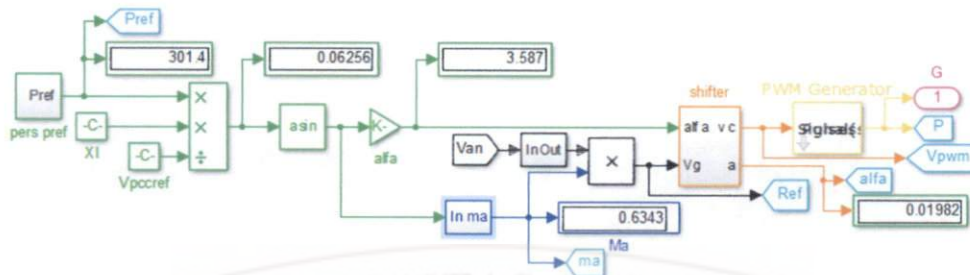
### 3.2.3. Pemodelan Beban

Untuk beban rumah tinggal dimodelkan dengan rangkaian beban Resistif dan Induktif dengan kombinasi disesuaikan dengan variasi pengujian.



Gambar 3.8 Model Simulink Beban Rumah

### 3.2.4. Perancangan Sistem Kontrol



Gambar 3.9 Model Simulink Persamaan Sistem Kontrol

Sistem kontrol yang digunakan untuk sistem PLTS berdasarkan persamaan aliran daya sistem PLTS tersambung grid.

Dari persamaan (19), (20) dan (21) tersebut maka didapat nilai  $\alpha$  dan  $m_a$  dengan menentukan bahwa nilai  $V_{pcc}$  konstan 220 dan  $X_l$  adalah reaktansi saluran sistem yang menghubungkan terminal inverter dengan terminal grid dan beban (L dan transformator). Dengan menginginkan daya reaktif sistem PLTS mendekati nol maka nilai  $Q$  pada persamaan (20) dibuat nol. Persamaan  $P$  dan  $Q$  merupakan persamaan fungsi  $\alpha$  dan  $m_a$  yang memiliki akar-akar persamaan pada nilai  $\alpha$  dan  $m_a$  tertentu. Pada nilai-nilai akar tersebutlah  $P$  dan  $Q$  bernilai optimum sesuai yang dikehendaki. Perhitungan nilai akar dengan cara penyelesaian substitusi.

Dari persamaan (19), nilai  $P$  ditetapkan sebagai nilai  $P$  maksimum yang diinginkan, sesuai dengan keluaran PV array serta keluaran sistem PLTS harus memenuhi syarat sinkronisasi yaitu nilai tegangan dan frekuensi sama dengan jaringan grid [18]. Persamaan kontrol  $\alpha$  dan  $m_a$  tersebut dijabarkan sebagai berikut.



$$P_{\max} = \frac{VV_{pwm}}{X_L} \sin \delta \quad (22)$$

$$\delta = \arcsin \left( \frac{P_{\max} X_L}{220^2} \right) \quad (23)$$

Dari persamaan (17) dan (18)

$$m_a = \frac{(V_{inv}/a)\sqrt{2}}{V_{dc} \cos \delta} \quad (24)$$

$$m_a = \frac{81.163609707487}{V_{dc} \cos \delta} \quad (25)$$

Dengan  $a$  adalah rasio transformator yang digunakan 230/60

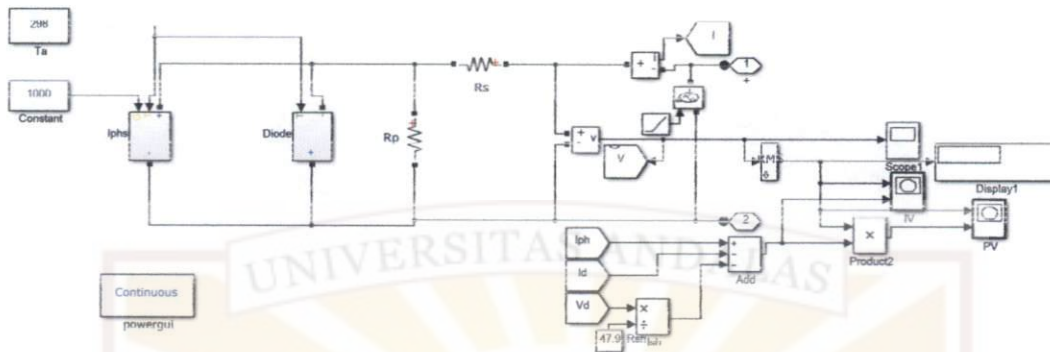
Maka persamaan (23) dan (25) tersebut dijadikan sebagai persamaan untuk mengontrol signal sinusoidal SPWM gate inverter.

Nilai konstanta  $X_L$  yang digunakan adalah = 10.04407446 ohm. Nilai ini dihitung menggunakan persamaan (23) dan (25) dengan memasukkan data simulasi awal (Lampiran 1) yang dikontrol manual untuk beberapa variasi beban dan irradiasi.

Persamaan kontrol juga diujikan dengan menggunakan metode Newton Raphson (NR). Dimana P dan Q sebagai persamaan non linear dengan akar-akar tertentu untuk mencapai nilai optimumnya. Adapun langkah penyelesaian dan hasil simulasi Matlab 2012 dengan metode NR tersebut lengkapnya pada Lampiran 2.

### 3.3. Pengujian Sistem

### 3.3.1. Rangkaian Pengujian Karakteristik Panel surya

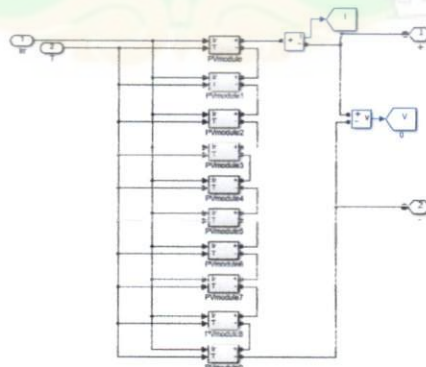


*Gambar 3.10 Rangkaian Simulink Pengujian Karakteristik Panel Surya*

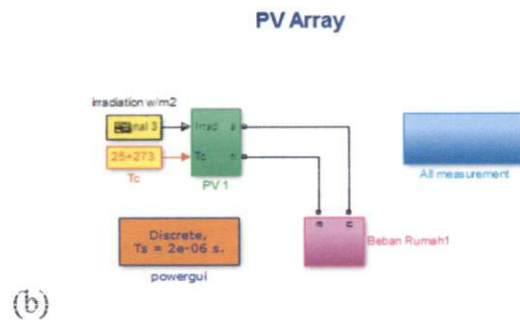
Untuk melihat karakteristik panel surya yang telah dimodelkan, maka pengujian dilakukan pada kondisi nominal panel surya yaitu Irradiasi  $1000\text{W/m}^2$  dan temperatur sel ( $T_c$ )  $25^\circ\text{C}$ .

### 3.3.2. Rangkaian Pengujian PV Array

PV array dibentuk dari 10 buah panel surya yang dihubungkan seri. Pengujian karakteristik PV array dilakukan pada Irradiasi  $1000\text{W/m}^2$  dan temperatur sel ( $T_c$ )  $25^\circ\text{C}$ .



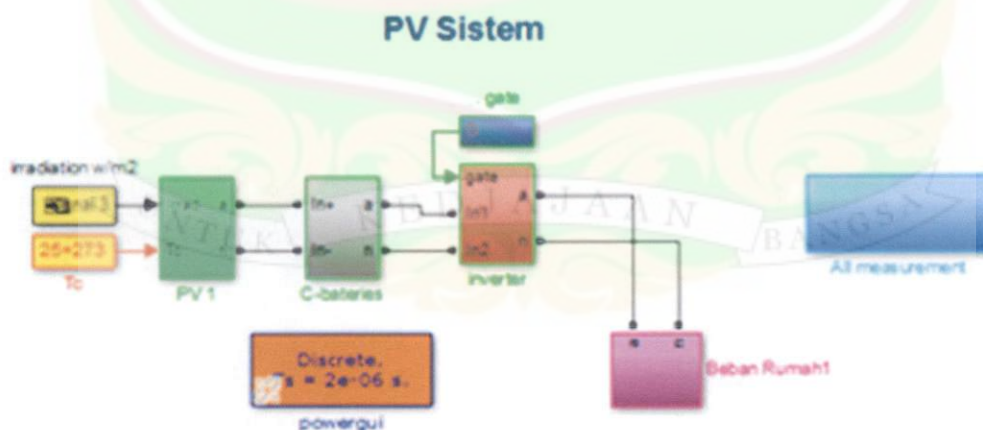
(a)



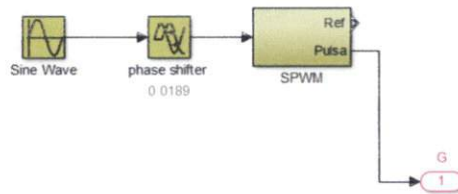
Gambar3.11 (a) Rangkaian Simulink Membentuk PV Array dan (b) Rangkaian Pengujian PV Array

### 3.3.3. Rangkaian Pengujian PV Array dan Inverter

Interface PV array dengan inverter adalah sebuah kapasitor *DC link* dengan nilai 9.4mF dan jenis inverter yang digunakan adalah MOSFET 2 lengan dengan spesifikasi terlihat pada Gambar 3.12 dibawah. Gate MOSFET menggunakan SPWM yang dibentuk dari signal sinus dibandingkan dengan gelombang segitiga dalam blok PWM generator.

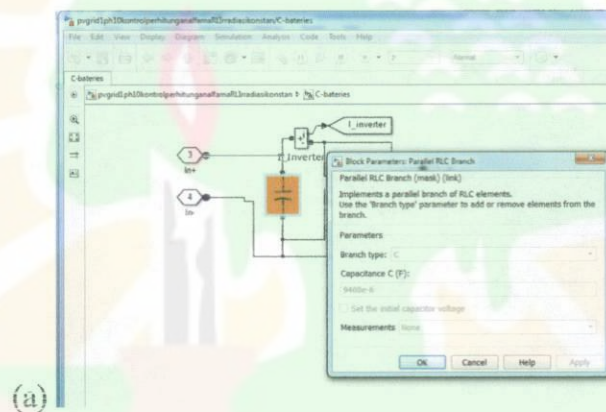




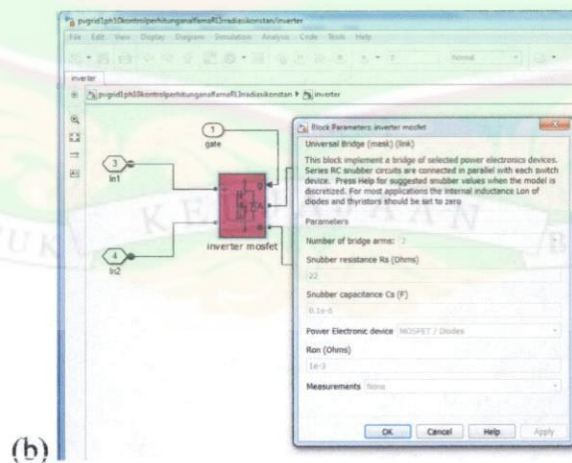


(b)

Gambar 3.12 (a) Rangkaian Simulink Pengujian Inverter PV (b) Rangkaian Gate Inverter



(a)

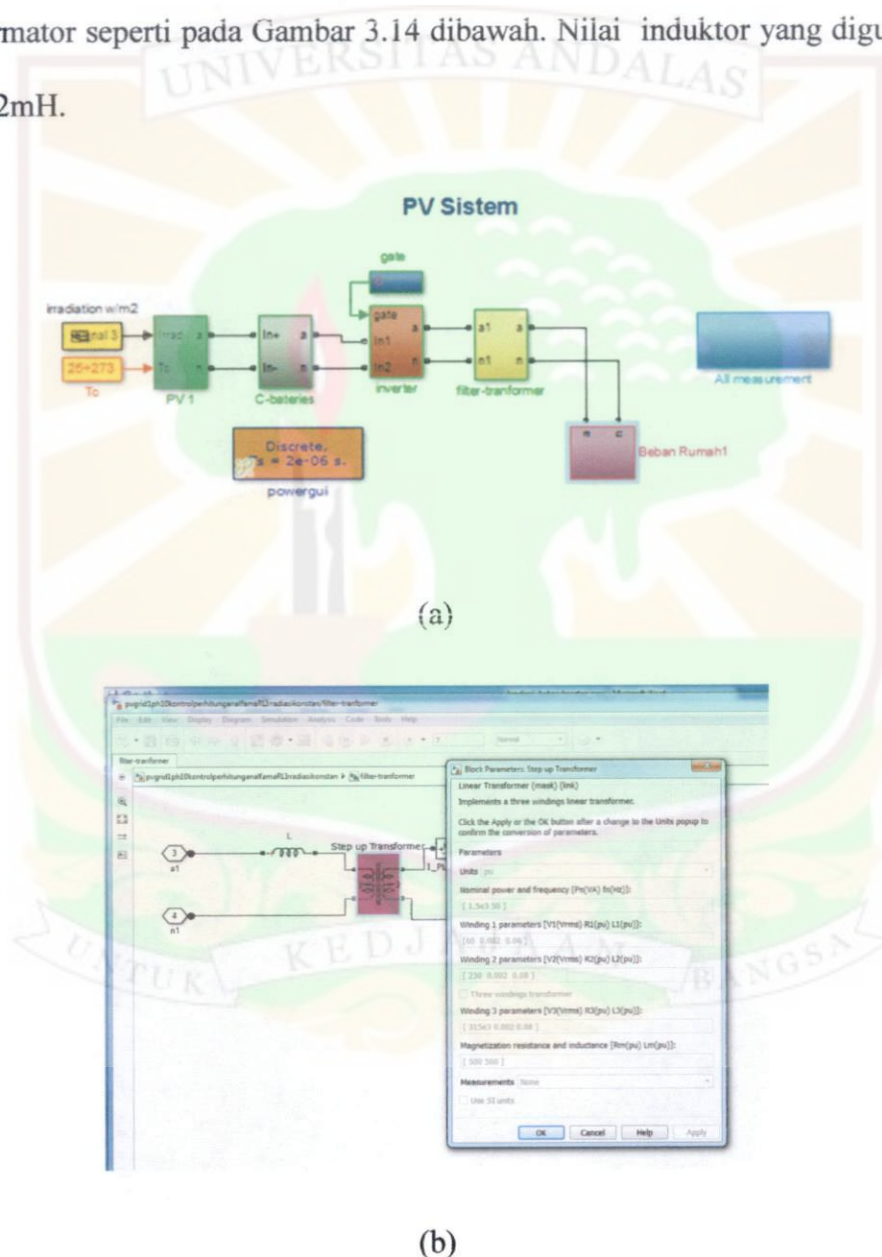


(b)

Gambar 3.13. Blok Parameter (a) Kapasitor DC Link dan (b) Inverter PV

### 3.3.4. Rangkaian Pengujian Sistem PLTS

Pembangunan model sistem PLTS adalah dengan menambahkan filter orde satu berupa induktor dan transformator untuk interface ke beban dan grid. Karena sistem yang dimodelkan tidak menggunakan konverter DC-DC boost, maka digunakan transformator penaik tegangan hingga 220 Volt. Spesifikasi transformator seperti pada Gambar 3.14 dibawah. Nilai induktor yang digunakan adalah 2mH.

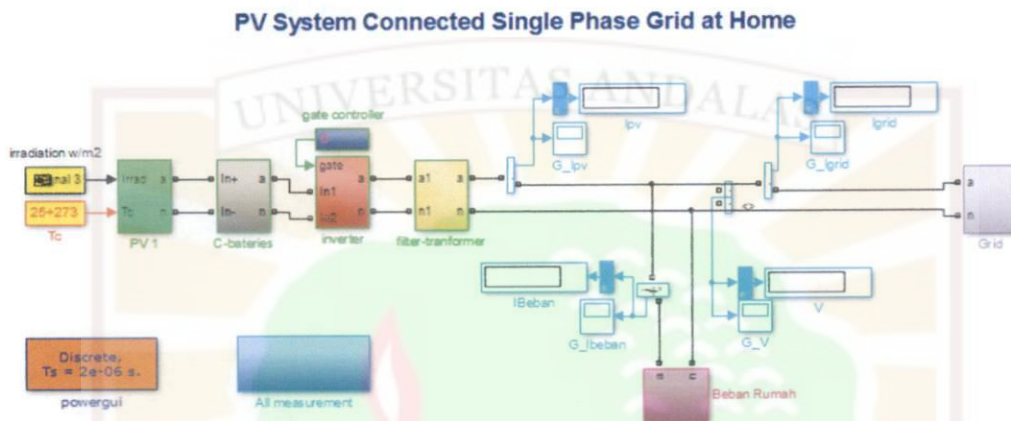


Gambar 3.14 (a) Model Simulink Sistem PLTS dengan Filter dan Transformator

(b) Blok Parameter Transformator Sistem PLTS

### 3.3.5. Rangkaian Pengujian Sistem PLTS Tersambung Grid tanpa Kontrol dan dengan Kontrol

Berikut adalah gambar rangkaian lengkap model simulasi sistem PLTS tersambung grid satu fasa pada rumah tinggal.

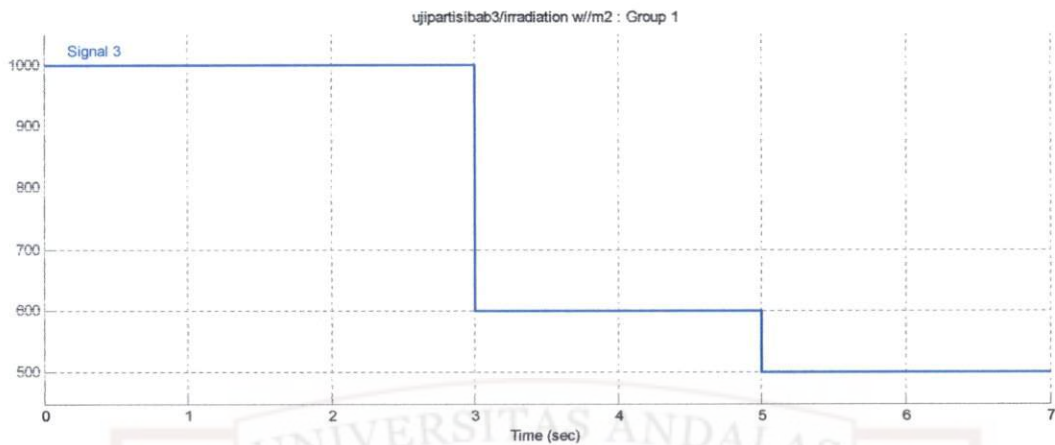


Gambar 3.15 Rangkaian Pengujian Sistem PLTS Tersambung Grid

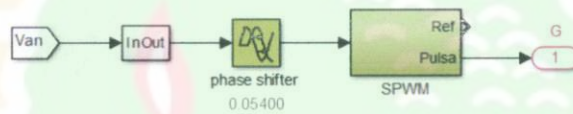
#### 3.3.5.1. Pengujian Sistem tanpa Kontrol

Pada pengujian sistem tanpa kontrol ini, gate inverter hanya diatur dengan duty cycle dan pergeseran fasa konstan dan tanpa kontrol manual untuk setiap perubahan input irradiansi. Dengan sumber gelombang sinus untuk SPWM adalah dari sensor tegangan grid yang dijadikan amplitudonya 1. Variasi input irradiansiyang diujikan seperti pada Gambar 3.16 .





*Gambar 3.16 Signal Input Irradiasi PV*



*Gambar 3.17 Rangkaian Gate Inverter Sistem PV Tersambung Grid Tanpa Kontrol*

### 3.3.5.2. Pengujian Sistem dengan Kontrol

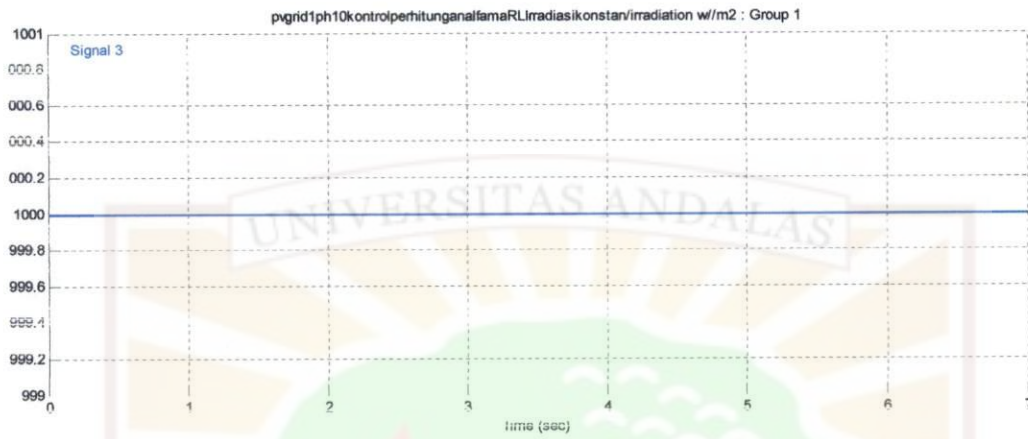
Sistem PLTS dihubungkan dengan grid yang bertegangan 220V dan beban rumah sesuai kombinasi sistem. Pengujian sistem dilakukan untuk beberapa perlakuan tetapi dengan membuat  $T_c$  tetap konstan. Selama pengujian, untuk selama waktu 1 second pertama sistem PLTS terhubung ke beban saja dan kemudian setelahnya sistem terhubung dengan grid.

Adapun kombinasi sistem yang diujikan adalah dalam tiga mode, yaitu:

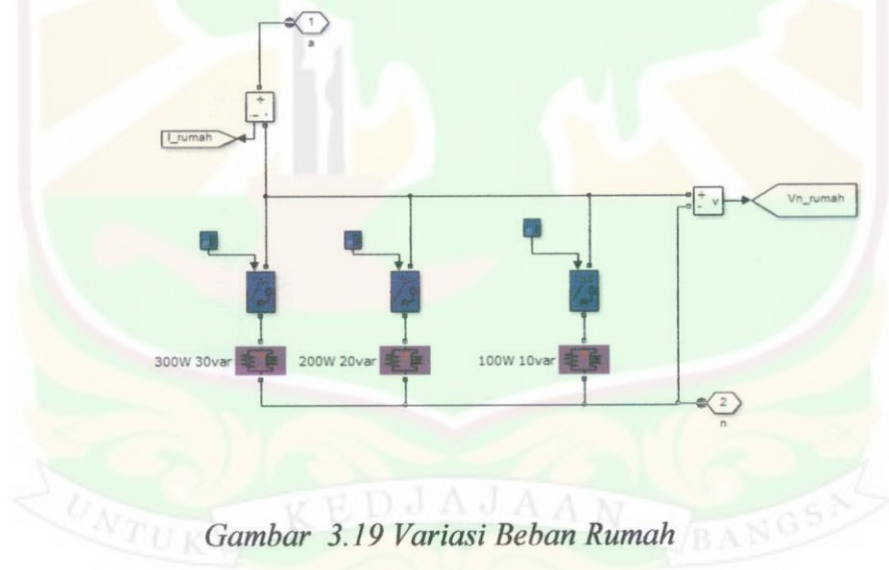
- Irradiasi konstan dengan beban berubah
- Irradiasi berubah dengan beban konstan

c. Irradiasi berubah dan beban berubah

### 1. Irradiasi konstan dengan beban berubah

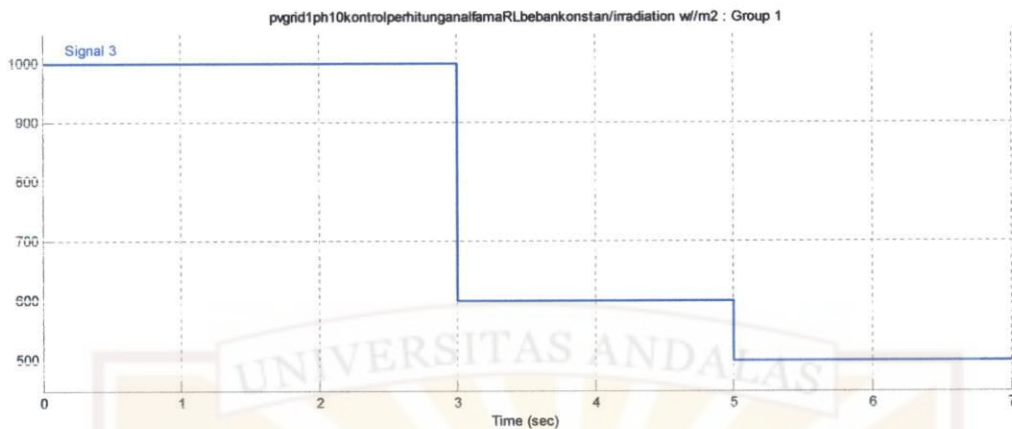


Gambar 3.18 Signal Irradiasi Konstan  $1000\text{W/m}^2$

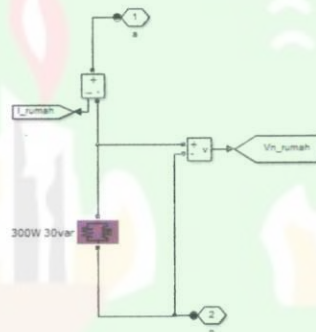


Gambar 3.19 Variasi Beban Rumah

## 2. Irradiasi berubah dengan beban konstan



Gambar 3.20 Signal Irradiasi Variasi 1000,600,dan 500W/m<sup>2</sup>



Gambar 3.21 Beban Rumah Konstan

## 3. Irradiasi berubah dan beban berubah

Untuk pengujian irradiasi dan beban berubah, diujikan kombinasi irradiasi seperti pengujian 2 dan dengan variasi beban pengujian 1. Dimana Variasi irradiasi bernilai 1000,600 dan 500 w/m<sup>2</sup> dengan beban 100 W 10 var, 200 w 20 var dan 300W 30 var.



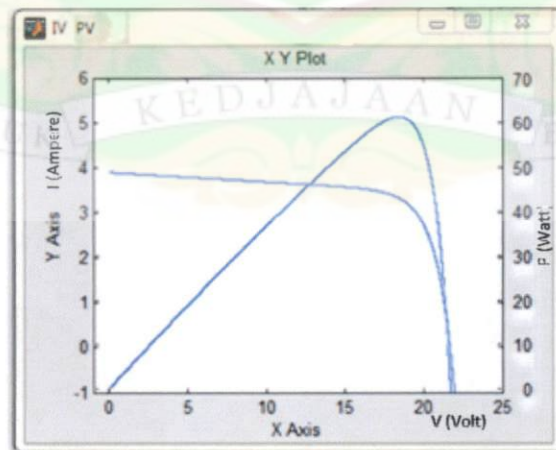
## BAB IV

### HASIL DAN ANALISA

#### 4.1. Hasil Pengujian

##### 4.1.1. Karakteristik Panel Surya

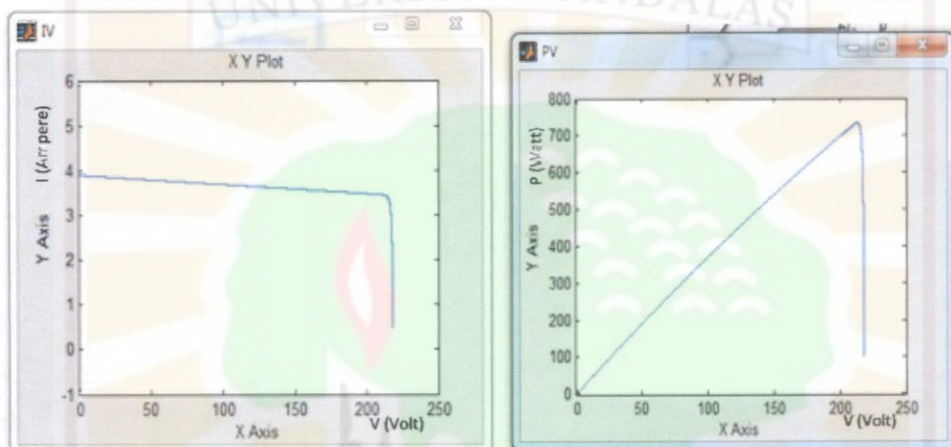
Tujuan pemodelan panel surya adalah untuk mencapai kurva IV serupa dengan grafik yang diberikan pada data sheet pabrikan panel surya. Semakin mirip, model semakin lebih baik. Dari hasil simulasi didapat kurva karakteristik model panel surya yang hampir sama dan sesuai dengan hasil yang diinginkan. Kurva IP-V sesuai dengan teori karakteristik panel surya. Juga nilai tegangan  $V_m$  dan arus  $I_m$  pada daya maksimum modul hampir sama dengan yang diindikasikan oleh pabrikan panel surya SHARP NDT060M1. Dimana daya maksimum  $P_{max}$  63.87 W dan arus maksimum  $I_m$  3.65A pada tegangan 17.51 Volt. Adapun karakteristik IP-V hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.1.



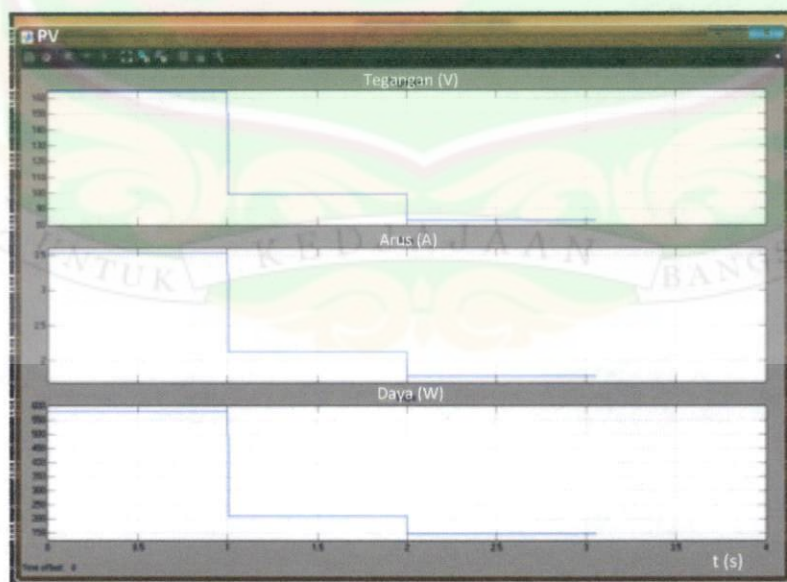
*Gambar 4.1 Kurva Karakteristik IP-V Panel Surya*

#### 4.1.2. Karakteristik PV Array

PV array yang digunakan untuk sistem PLTS ini terdiri dari 10 panel surya yang dihubungkan seri. Adapun karakteristiknya ditunjukkan oleh Gambar 4.2 dibawah. Dari gambar terlihat bahwa nilai arus PV array tetap dan daya maksimum PV array 649.8 W dengan tegangan  $V_{oc}$  menjadi  $10 \times V_{oc}$  panel surya.



Gambar 4.2 Kurva Karakteristik IP-V PV Array

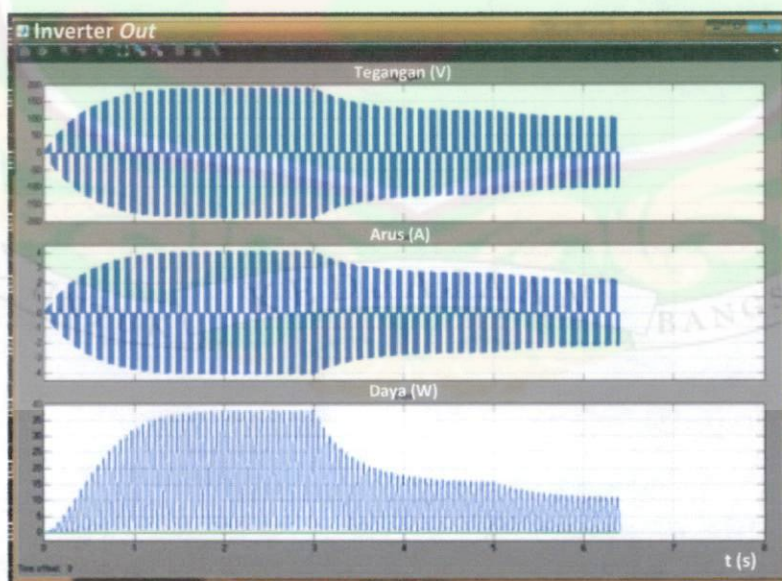


Gambar 4.3 Keluaran PV Array Dengan Input Irradiasi Berubah

Dari gambar diatas, nilai keluaran PV array untuk variasi pertama irradiansi  $1000\text{W/m}^2$  adalah; tegangan 164.5 V, arus 3.531A dengan daya keluaran 580.6 W. Nilai-nilai tersebut berkurang seiring dengan berkurangnya nilai irradiansi yang diinputkan.

#### 4.1.3. PV Array dengan Inverter

Langkah selanjutnya dalam pembangunan model sistem PLTS adalah pengujian PV array dengan penambahan inverter yang disambung melalui kapasitor *DC link*. Pengujian ini untuk melihat bentuk gelombang tegangan dan arus keluaran inverter. Hasil pengujian seperti terlihat pada Gambar 4.4 dibawah. Bentuk gelombang tegangan dan arus keluaran inverter berupa gelombang persegi.

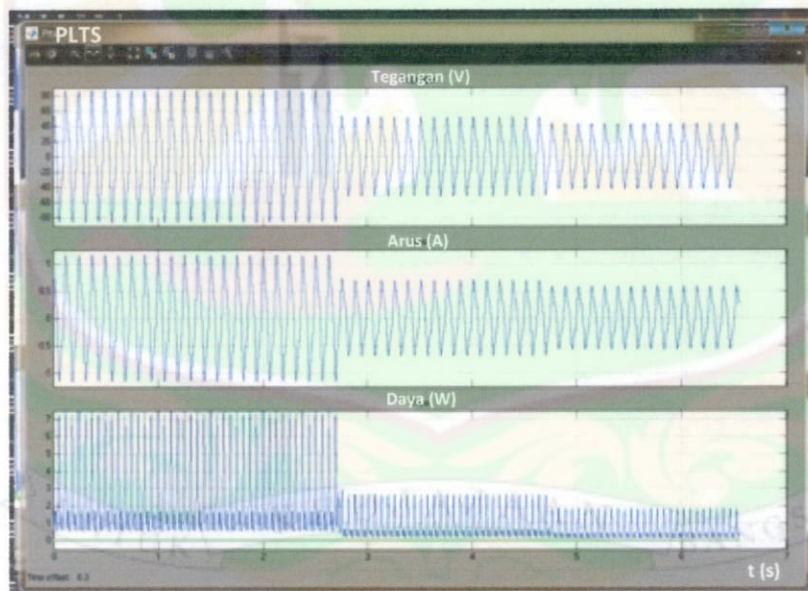


Gambar 4.4. Keluaran Inverter yang Tersambung PV Array



#### 4.1.4 Sistem PLTS

Untuk interface ke jaringan grid dan beban, maka perlu adanya sinkronisasi. Sehingga keluaran sistem PLTS harus memenuhi syarat sinkronisasi tersebut yaitu dengan penyamaan magnitude dan frekuensi tegangan, terutama bentuk gelombang tegangan harus sinusoidal. Keluaran inverter sebelumnya dilewatkan pada sebuah induktor dan transformator penaik tegangan. Hasil keluaran sistem PLTS ditunjukkan pada gambar dibawah. Bentuk gelombang tegangan keluaran sistem PLTS telah sinusoidal, meskipun nilai input irradiansi berubah.



*Gambar 4.5 Bentuk Gelombang Keluaran Sistem PLTS*

4.1.5. Sistem PLTS Tersambung Grid tanpa Kontrol dan dengan Kontrol

4.1.5.1. Sistem PLTS Tersambung Ke Grid Tanpa Kontrol

Pengujian sistem PLTS tersambung grid tanpa kontrol dengan mengatur tegangan keluaran sistem PLTS agar memenuhi syarat sinkronisasi. Setelah terpenuhi kemudian disambung dengan grid dan dilihat perlakuan sistem. Pada tabel dibawah ditunjukkan Tegangan titik PCC sistem tidak mencapai tegangan yang diinginkan, bernilai 211Volt. Daya beban rumah tinggal pun tidak terpenuhi dengan baik. Adapun aliran daya sistem dilihatkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Aliran Daya Sistem PLTS Tersambung Grid tanpa Kontrol

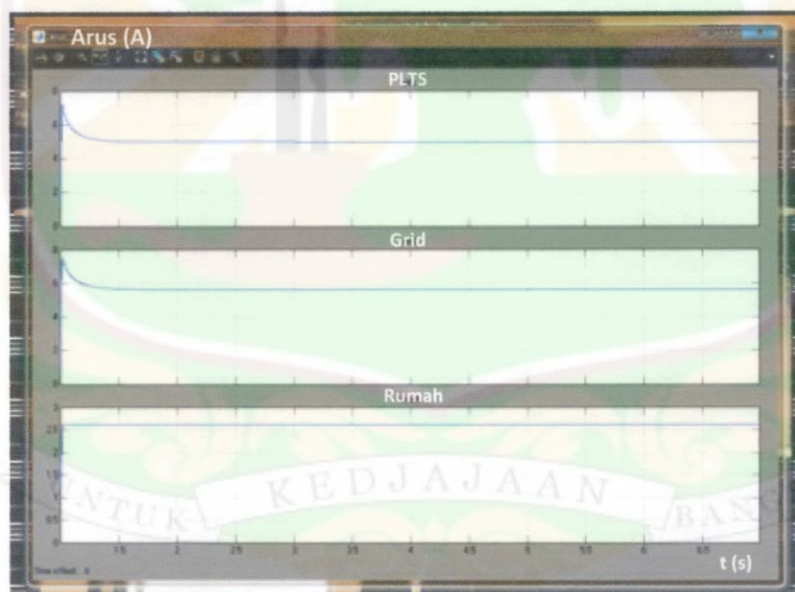
No	Irradiasi W/m2	Beban rumah (W)	Vpcc (Volt)	Daya aktif P (W)			Daya reaktif Q (var)		
				PLTS	Grid	Rumah	PLTS	Grid	Rumah
1	1000	650	211	-7.717	-559.7	551.6	-1050	1050	0



Gambar 4.6 Kurva Aliran Daya Sistem tanpa Kontrol



*Gambar. 4.7 Kurva Tegangan PCC Sistem tanpa Kontrol*

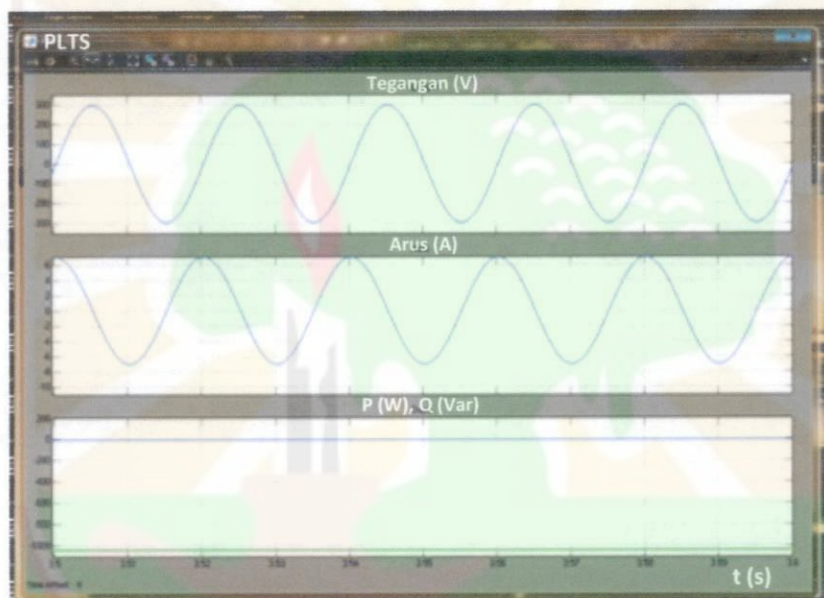


*Gambar 4.8 Kurva Aliran Arus Sistem tanpa Kontrol*

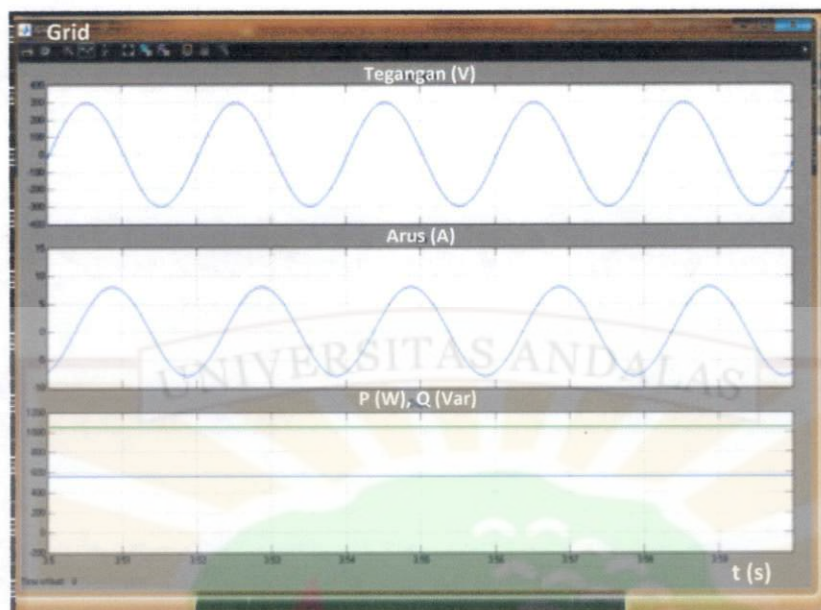
Bentuk gelombang sistem untuk masing-masing sisi dapat dilihat pada gambar dibawah, dimana bentuk gelombang keluaran sistem PLTS dan grid



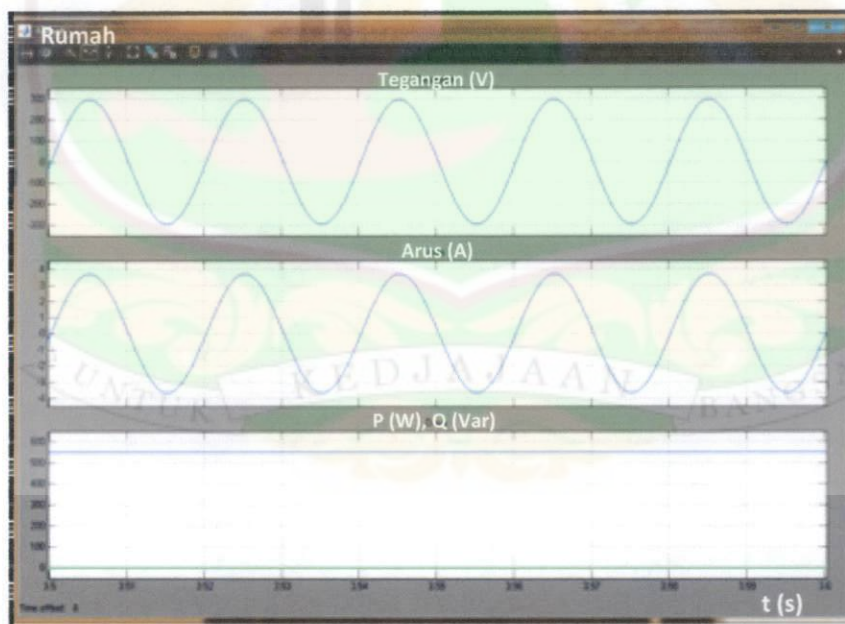
sinusoidal. Tetapi dapat dilihat perbedaan fasa tegangan dan arus masing- masing sisi tersebut ada yang tertinggal dan ada yang terdahulu. Dan dapat diketahui bahwa sistem memiliki nilai  $Q$  daya reaktif yang besar. Pada sisi beban rumah tinggal bentuk gelombang arus dan tegangan sinusoidal murni dan sefasa. Karena bebang yang terpasang hanya beban resistif.



*Gambar 4.9 Bentuk Gelombang Sisi Sistem PLTS tanpa Kontrol*



*Gambar 4.10 Bentuk Gelombang Sisi Sistem Grid tanpa Kontrol*



*Gambar 4.11 Bentuk Gelombang Sisi Beban Rumah tanpa Kontrol*

#### 4.1.5.2. Sistem PLTS Tersambung Ke Grid dengan Kontrol

Pengujian model sistem PLTS tersambung grid satu fasa diperlakukan untuk beberapa mode untuk mengetahui kinerja sistem kontrol yang diterapkan. Hasil masing-masing mode pengujian adalah sebagai berikut:

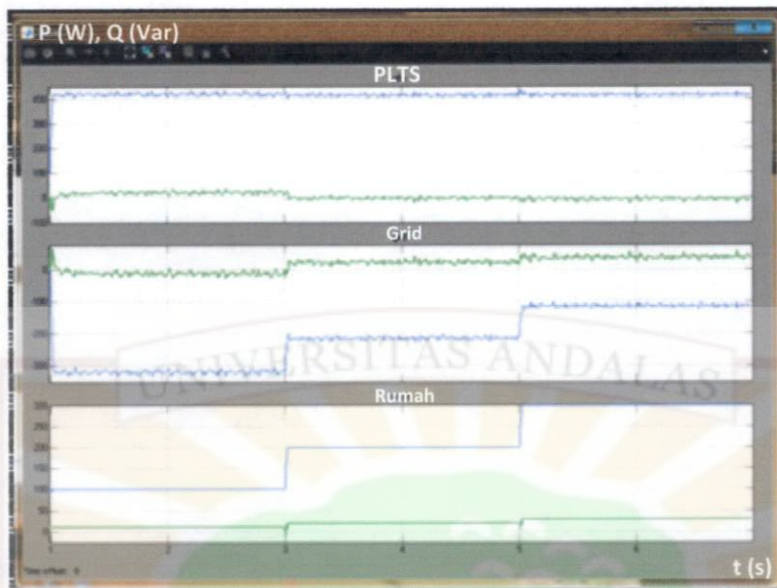
##### 1. Irradiasi Konstan dan Beban berubah

Mode pertama adalah dengan mengujikan variasi beban sedangkan input irradiasi konstan. Aliran daya sistem dapat dilihat pada tabel 4.2. Dan Hasil pengujian sistem seperti pada gambar dibawah.

*Tabel 4.2 Aliran Daya Sistem PLTS Tersambung Grid Irradiasi Konstan*

No	Irradiasi W/m <sup>2</sup>	Beban rumah (W-Var)	V <sub>pcc</sub> (Volt)	Daya aktif P (W)			Daya reaktif Q (var)		
				PLTS	Grid	Rumah	PLTS	Grid	Rumah
1	1000	100W 10 Var	220.6	418.4	-318.1	100.3	24.51	-14.48	10.02
2		200W 20Var	220.1	417.9	-217.9	200	-7.827	27.81	19.98
3		300W 30Var	219.9	417.9	-118.4	299.5	-6.425	36.37	29.94

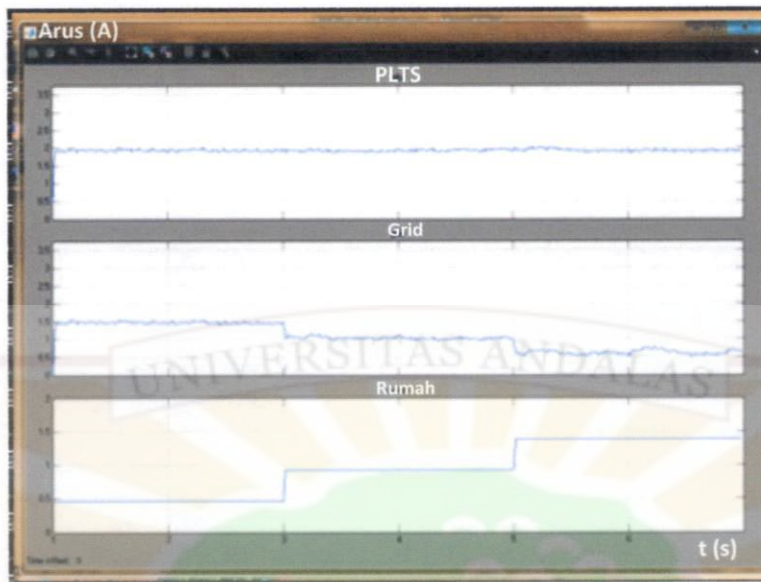




Gambar 4.12 Kurva Aliran Daya Sistem Irradiasi Konstan



Gambar. 4.13 Kurva Tegangan PCC Sistem Irradiasi Konstan



*Gambar. 4.14 Kurva Arus Sistem Irradiasi Konstan*

Dari gambar terlihat bahwa daya keluaran sistem PLTS konstan dengan daya reaktif mendekati nol, sedangkan daya dari grid mengikuti perubahan beban. Jika daya dari PLTS melebihi beban yang akan disuplainya, maka daya mengalir ke jaringan grid. Dan pada saat daya sistem PLTS kurang dari kebutuhan beban, maka grid memberikan suntikan daya sesuai kekurangan daya beban oleh sistem PLTS. Tegangan PCC sistem yang harus dijaga konstan seperti pada gambar 4.13, ternyata sistem kontrol bekerja dengan baik, dengan menjaga tegangan PCC konstan  $\approx 220$  Volt sesuai dengan keinginan yang diharapkan. Bentuk gelombang masing-masing sisi sistem dapat dilihat di lampiran 3 (1).

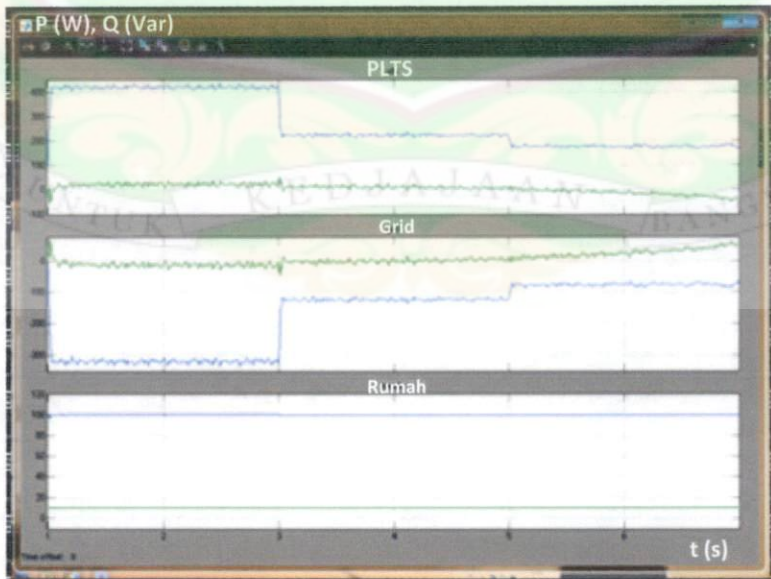
## **2. Irradiasi Berubah dan Beban Konstan**

Seperti halnya pengujian mode pertama, tetapi pengujian ini menerapkan input irradiasi yang berubah dengan beban yang akan dilayani konstan. Hasil

pengujian pada Gambar 4.15 dibawah, menunjukkan bahwa aliran daya grid mengikuti perubahan aliran daya sistem PLTS. Sistem grid menjadi penyeimbang pemenuhan kebutuhan beban. Semakin kecil irradiansi maka keluaran sistem PLTS juga semakin kecil. Sehingga dengan beban konstan, grid menjadi bertambah positif. Nilai tegangan PCC pada pengujian ini seperti ditunjukkan Gambar 4.16 tetap konstan  $\approx 220\text{Volt}$ . Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan sistem masih terkontrol.

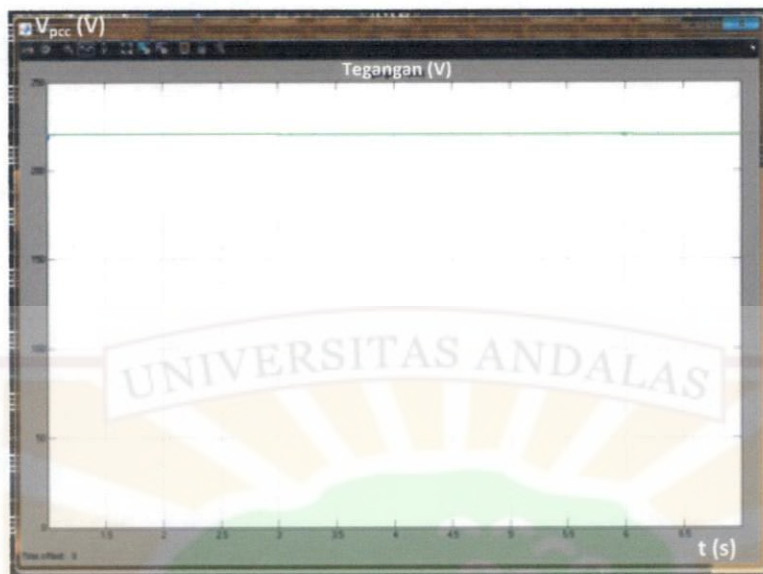
Tabel 4.3 Aliran Daya Sistem PLTS Tersambung Grid Beban Konstan

No	Irradiasi W/m2	Beban rumah	Vpcc (Volt)	Daya aktif P (W)			Daya reaktif Q (var)		
				PLTS	Grid	Rumah	PLTS	Grid	Rumah
1	1000	100W  10Var	220.7	419.2	-318.9	100.3	24.64	-14.62	10.03
2	600		220.3	218.4	-118.4	100	0.8645	9.136	10
3	500		219.8	170.2	-70.47	99.7	-36.71	46.68	9.971

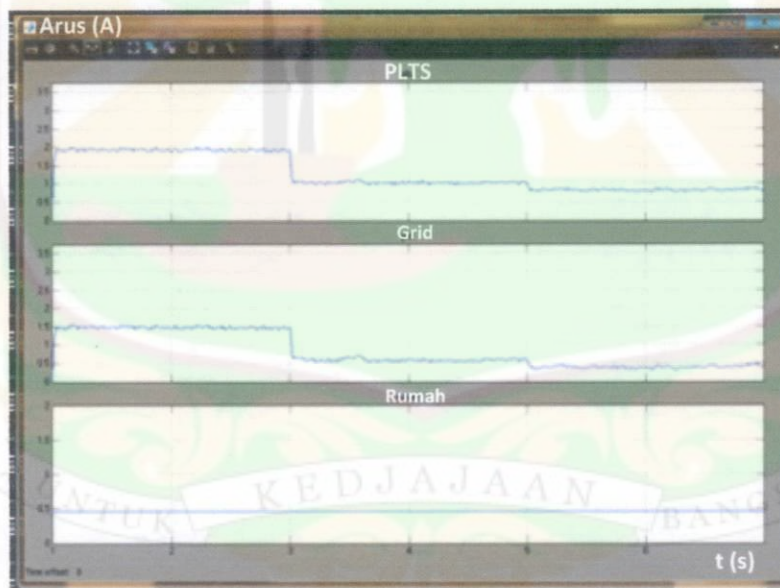


Gambar 4.15 Kurva Aliran Daya Sistem Beban Konstan





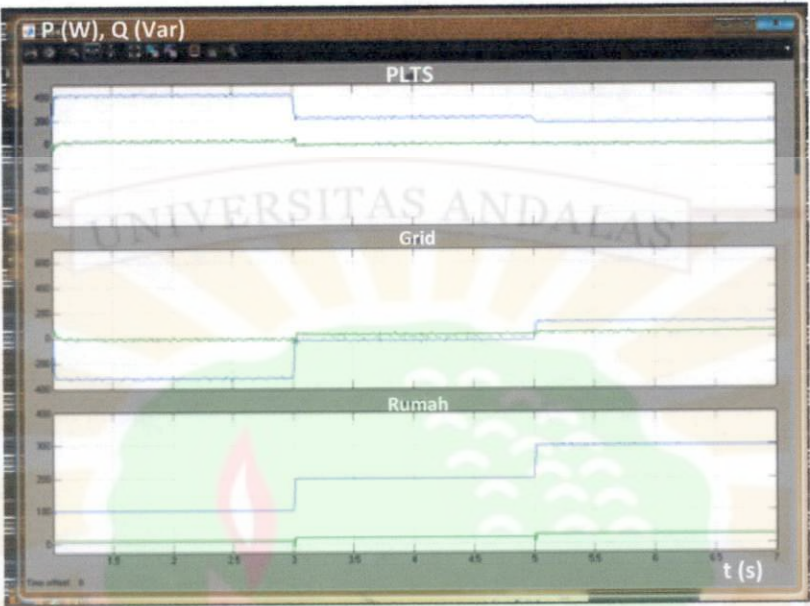
*Gambar. 4.16 Kurva Tegangan PCC Sistem Beban Konstan*



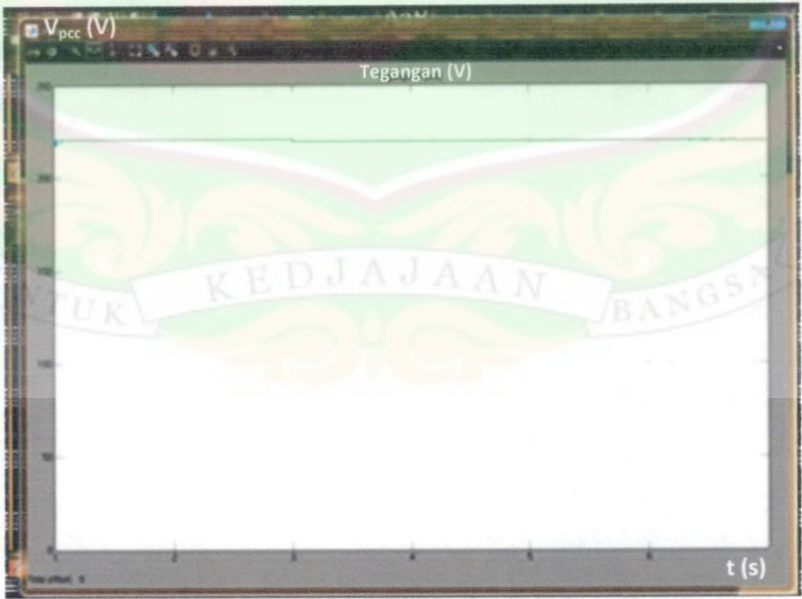
*Gambar. 4.17 Kurva Arus Sistem Beban Konstan*

Bentuk gelombang masing-masing sisi sistem dapat dilihat di lampiran 3 (2).

3. Irradiasi Berubah dan Beban Berubah



Gambar 4.18 Kurva Aliran Daya Sistem Irradiasi dan Beban Berubah



Gambar. 4.19 Kurva Tegangan PCC Sistem Irradiasi dan Beban Berubah



*Gambar. 4.20 Kurva Arus Sistem Irradiasi dan Beban Berubah*

Pada pengujian ini, sistem diberi input irradiasi berubah dan juga beban rumah tinggal yang berubah. Pada Gambar 4.18 hasil pengujian simulasi, daya keluaran sistem PLTS sebanding dengan nilai input irradiasinya. Terlihat bahwa adanya perlakuan menyerap dan menyuplai juga kondisi netral pada grid. Saat daya keluaran sistem PLTS melebihi kebutuhan beban, maka grid akan menyerapnya, sedangkan saat keluaran sistem PLTS mendekati sama dengan kebutuhan beban, grid juga menyuplai atau menyerap dengan nilai mendekati nol. Artinya pada saat itu beban rumah dipenuhi oleh sistem PLTS saja tanpa perlakuan dengan grid. Tetapi pada saat kondisi sistem PLTS berubah jadi tidak mencukupi kebutuhan beban, grid kembali berlaku sebagai penyuplai.



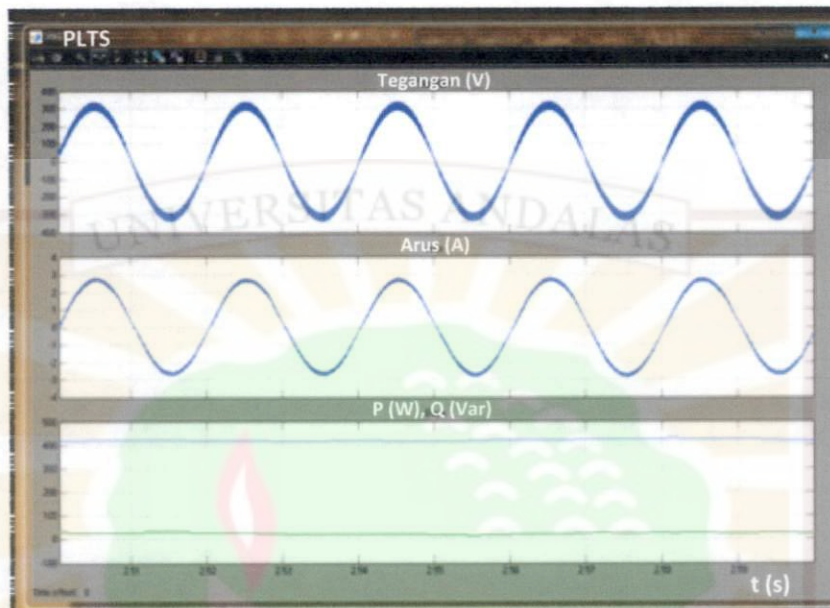
Bentuk gelombang keluaran sistem PLTS untuk tiap variasi irradiansi dapat dilihat pada gambar dibawah. Dari bentuk gelombang arus dan tegangan dapat daerah kerja masing-masing sistem. Dimana untuk sisi sistem PLTS, gelombang arus dan tegangannya sefasa, begitu juga dengan bentuk gelombang sisi beban rumah. Sedangkan untuk sisi grid, bentuk gelombang tegangan dan arus bias sefasa dan berbeda fasa  $180^{\circ}$  sesuai kondisi apakah grid menyerap atau menyuplai daya di sistem tersebut.

Pada pengujian ini terlihat jelas untuk setiap kerja sistem PLTS tersambung grid. Kondisi dimana grid menjadi penyuplai dan penyerap untuk waktu tertentu. aliran daya yang terjadi adalah seperti dalam tabel berikut.

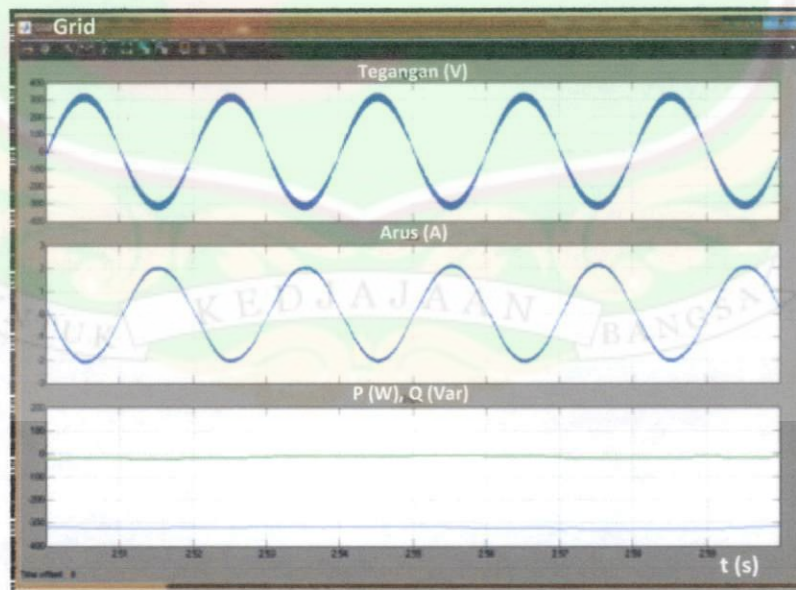
*Tabel 4.4 Aliran Daya Sistem PLTS Tersambung Grid Irradiansi dan Beban Berubah*

No	Irradiansi W/m <sup>2</sup>	Beban Rumah	V <sub>pcc</sub> (Volt)	Daya aktif P (W)			Daya reaktif Q (var)		
				PLTS	Grid	Rumah	PLTS	Grid	Rumah
1	1000	100W 10Var	220.6	417.5	-317.2	100.3	20.48	-10.46	10.02
2	600	200W 20Var	220	226.1	-26.32	199.8	-0.7744	20.75	19.98
3	500	300W 30Var	219.7	170.2	128.9	299.1	-7.904	37.8	29.9

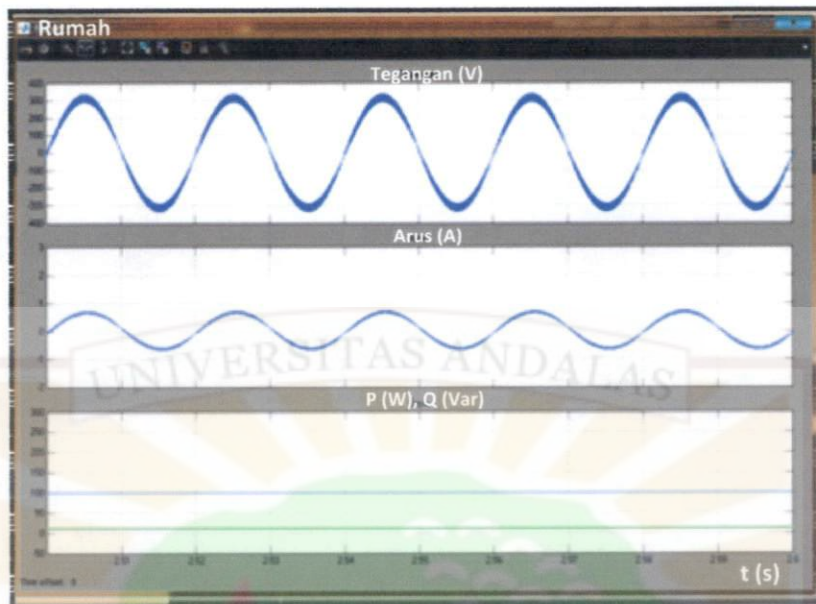
## Variasi waktu -1



Gambar 4.21 Bentuk Gelombang Sistem Sisi Sistem PLTS  $t-1$

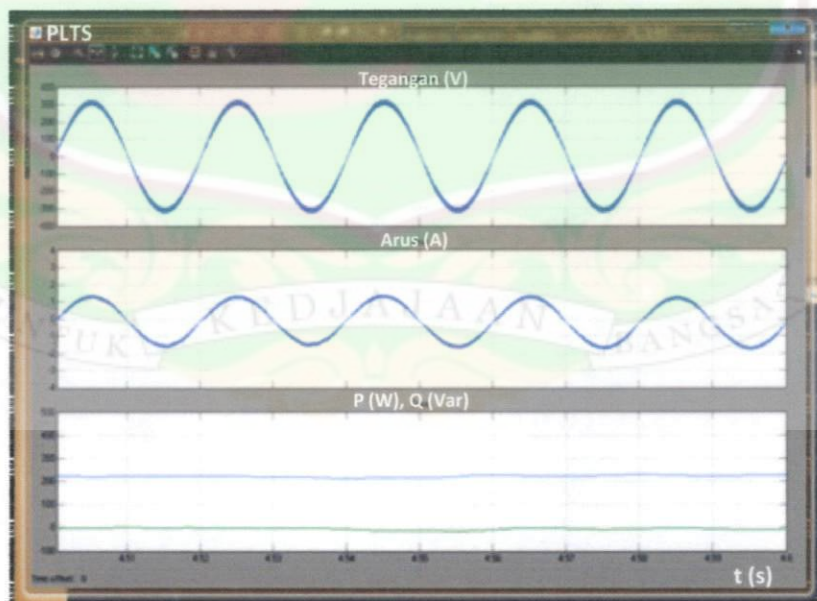


Gambar 4.22 Bentuk Gelombang Sistem Sisi Grid  $t-1$



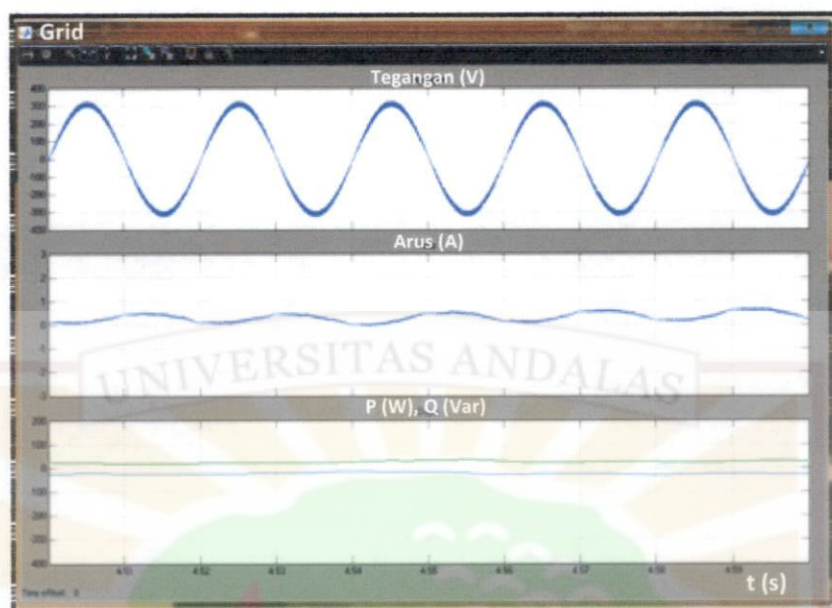
*Gambar 4.23 Bentuk Gelombang Sistem Sisi Beban Rumah t-1*

## Variasi waktu -2

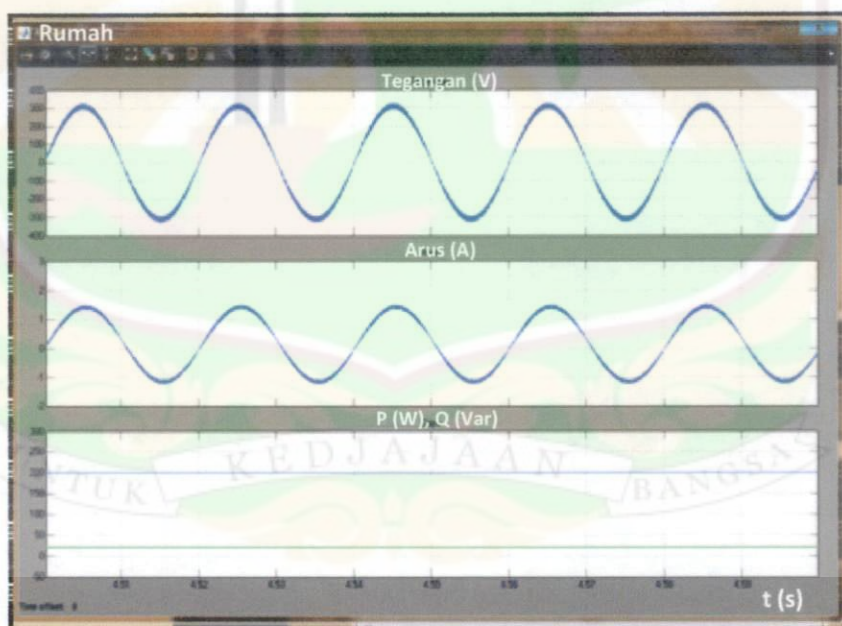


*Gambar 4.24 Bentuk Gelombang Sistem Sisi Sistem PLTS t-2*



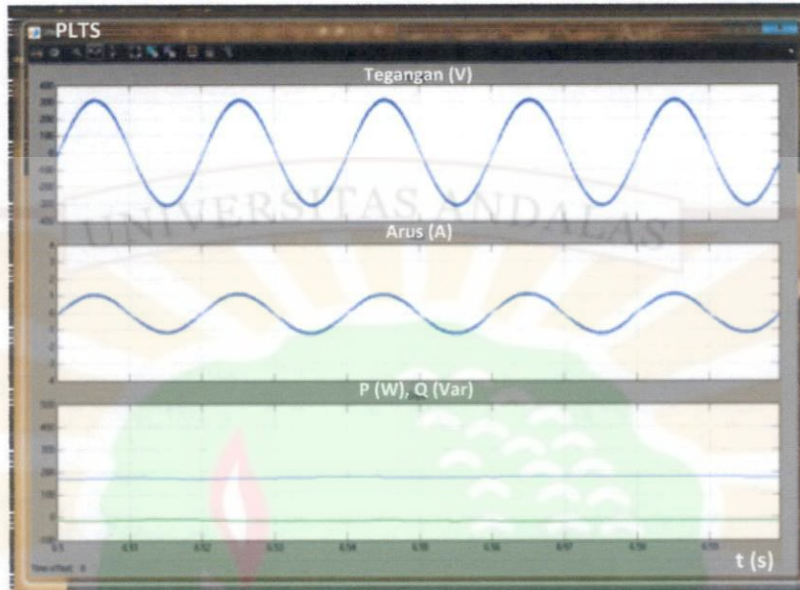


Gambar 4.25 Bentuk Gelombang Sistem Sisi Grid t-2

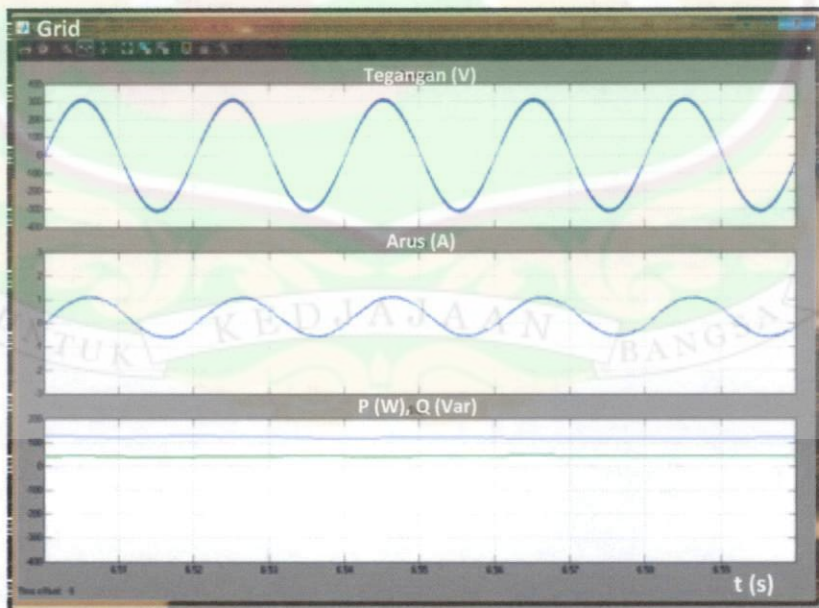


Gambar 4.26 Bentuk Gelombang Sistem Beban Rumah PLTS t-2

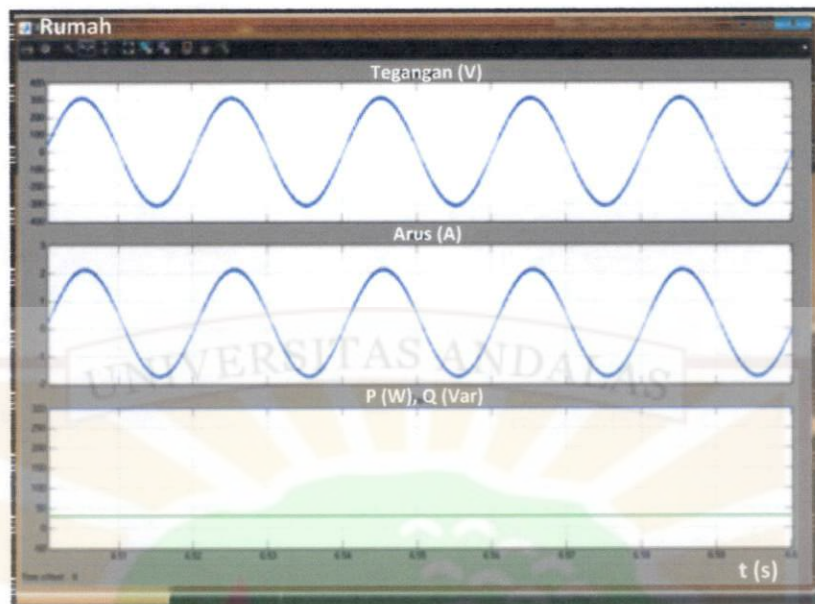
### Variasi waktu -3



Gambar 4.27 Bentuk Gelombang Sistem Sisi Sistem PLTS t-3



Gambar 4.28 Bentuk Gelombang Sistem Sisi Grid t-3



*Gambar 4.29 Bentuk Gelombang Sistem Sisi Beban Rumah t-3*

Dari hasil pengujian sistem tersebut dapat dilihat bahwa kontrol sistem bekerja baik untuk mode sistem dan terlihat pembagian daya sistem saat masing masing mode bekerja. Nilai Q sistem PLTS yang diharapkan mendekati nilai nol.

#### 4.2. Analisa

Pemodelan simulink MATLAB sistem PLTS tersambung grid pada rumah tinggal diawali dengan pemodelan dari panel surya hingga optimalisasi sistem PLTS. Pemodelan panel surya dikatakan berhasil dengan melihat karakteristik keluaran dari pemodelan tersebut. Seperti pengujian yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya [1][5]. Dan dari hasil simulasi pengujian karakteristik panel surya didapat bahwa karakteristik IV dan PV menunjukkan hasil yang hampir sama dengan karakteristik yang ada pada datasheet spesifikasi panel surya tersebut. Nilai maksimum atau titik MPP kurva IV –PV yang didapat adalah  $P_{max}$



63.87 W dan arus maksimum  $I_m$  3.65A pada tegangan 17.51 Volt. Nilai ini tidak persis sama dengan nilai yang dipaparkan oleh pabrikan panel surya. Ini karena pemodelan panel surya yang menggunakan  $R_s$  dan  $R_p$  yang mana nilainya dapat berbeda untuk beberapa metode pemodelan. Beberapa peneliti ada yang memberikan nilai besar untuk  $R_p$  dan kecil untuk  $R_s$  dan ada yang memberikan nilai  $R_p$  dan  $R_s$  berdasar hitungan definisi mereka [5]. Idealnya sebuah panel surya memiliki  $R_s$  nol dan  $R_p$  tak hingga [1]. Tetapi hasil pemodelan yang baik akan berada pada daerah mendekati nilai yang diberikan oleh pabrikan panel surya tersebut.

Panel surya kemudian dihubungkan seri untuk membentuk PV array sesuai kebutuhan dengan tujuan agar pembangkit surya memiliki tegangan yang cukup untuk dapat disambungkan ke grid dengan arus yang kecil. Juga mengurangi rugi-rugi akibat panas pada salurannya. Panel surya dijadikan sebagai sumber tegangan DC yang dipasang seri. Sehingga karakteristik PV array menunjukkan tegangan *open circuit*  $V_{oc}$  menjadi 220V dengan arus hubung singkat  $I_{sc}$  tetap 3.9A. dari hasil plot kurva IV-PV PV array dapat dilihat bahwa PV array dapat bekerja atau berlaku sesuai dengan data sheet dan persamaan (9) dan (10).

PV array disambungkan dengan inverter melalui sebuah DC link kapasitor yang berguna untuk mengurangi *ripple* keluaran PV array sebelum masuk ke inverter. Untuk interface ke grid, PV array dengan inverter dihubungkan dengan filter orde satu dan transformator penaik tegangan. Filter orde satu menggunakan induktor dengan nilai 2 mH. Penggunaan filter dan transformator ini untuk memenuhi syarat sinkronisasi sistem PLTS dengan jaringan grid. Dimana

*magnitude* dan frekuensi tegangan harus sama. Keluaran inverter yang belum sinus murni akan dilewatkan ke induktor sehingga ada filter sebelum tegangan dinaikkan.

Meskipun syarat sinkronisasi terpenuhi saat penyambungan pertama sistem dengan grid, tidak menutup kemungkinan saat keluaran sistem PLTS rendah atau kecil karena dipengaruhi oleh irradiasi matahari dan temperature lingkungan, sistem PLTS menjadi beban bagi grid. Maka akan terjadi kerusakan pada sistem PLTS. Oleh karena itu perlu adanya kontrol sistem PLTS agar tetap dapat menjadi sumber meskipun menghasilkan daya kecil.

Pada sistem ini, sistem PLTS yang dirancang menggunakan topologi tanpa *DC-DC converter* dan tanpa baterai *storage*. Sehingga kontrol sistem diterapkan pada inverternya. Pemilihan topologi yang sederhana dan dengan kontrol sistem yang sederhana untuk dapat diterapkan pada sebuah rumah tinggal dengan sistem PLTS tersambung grid. Penghematan biaya dan komponen dengan mereduksi baterai dan DC-DC konverter.

Kontrol dengan menggunakan MPPT dapat menyebabkan kenaikan tegangan titik PCC, sehingga akan berakibat pada inverter dan juga jaringan grid. Maka sistem kontrol yang dirancang harus bisa menjaga tegangan PCC konstan tetapi tetap menyalurkan daya maksimum pada sistem.

Salah satu langkah optimalisasi sistem PLTS adalah dengan daya yang dihasilkan atau yang disalurkan semaksimal mungkin dengan indikator nilai daya reaktif sistem PLTS seminimum mungkin. Dengan membuat daerah kerja konverter mosfet selalu mendekati menjadi inverter *unity*, maka kemungkinan



konverter menjadi beban atau berlaku sebagai konverter *bidirectional* sangat kecil sekali.

Dengan menggunakan persamaan (23) dan (25) telah diujikan untuk beberapa kondisi mode pengujian. Dengan perhitungan akar-akar persamaan baik secara substitusi atau metode iterasi Newton Raphson. Dari hasil pengujian dapat dikatakan bahwa sistem kontrol bekerja cukup baik. Tegangan di titik PCC mendekati nilai stabil 220Volt. Untuk daya reaktif sistem PLTS seperti terlihat pada Tabel 4.3, nilai maksimum Q sistem PLTS pada pengujian adalah 24.64Var. Nilai yang masih dapat ditoleransi. Sedangkan nilai maksimum P daya aktif sistem PLTS pada irradiasi  $1000 \text{ W/m}^2$  adalah 419.2W. Meskipun kecil dari nilai maksimum yang diberikan didatasheet yaitu  $60\text{W} \times 10 = 600 \text{ W}$ . Penurunan nilai maksimum daya ini karena adanya rugi-rugi pada inverter untuk keseimbangan DC *input* dan AC *output*. Dengan melihat daya reaktif dan fasa arus dan tegangan sistem PLTS, daya aktif yang disalurkan adalah daya maksimum sistem yang ada setelah pengurangan rugi-rugi rangkaian interface sistem PLTS.

Dari hasil simulasi juga dapat dilihat sistem kerja sistem PLTS tersambung grid, dimana adanya sistem *buy-back* dengan grid. Sistem PLTS dapat menyalurkan kelebihan dayanya dan dapat menarik daya saat daya keluaran PLTS tidak mencukupi dari jaringan grid. Pola *buy-back* ini menjadi keuntungan bagi kedua pihak, rumah tinggal dengan sistem PLTS dan grid. Karena pada saat grid harus memenuhi beban puncak, sistem PLTS dapat memberikan suntikan daya. Dan pada saat sistem PLTS tidak mencukupi maka grid dapat menyuplai beban rumah tinggal. Hal yang perlu diperhatikan bagi beban rumah tinggal adalah



pengelolaan beban lokal rumah tinggal. Bagaimana ia mengatur pola beban agar tidak banyak defisit energi.

Jika siang hari sistem PLTS memproduksi daya maksimum, sedangkan beban rumah tinggal rendah, maka kelebihan daya akan dikirim ke jaringan grid. Dan pada malam hari sistem PLTS menghasilkan daya kecil atau tidak ada, maka beban rumah tinggal disuplai oleh grid. Maka pada malam hari tersebut, pengguna beban rumah tinggal harus bisa mengelola bebannya agar pemakaian tidak melebihi daya yang terkirim selama siang hari ke jaringan.

Dengan melihat pola irradiansi matahari daerah tropis, daya keluaran sistem PLTS hampir konstan selama rata-rata 6-7 jam sehari. Dan penggunaan beban rumah tinggal juga hendaknya terdistribusi sebanyak energi yang dihasilkan oleh sistem PLTS siang hari tersebut agar dapat menikmati keuntungan pola *buy-back* ini. Sehingga beban rumah tinggal secara periodik dapat dipasok sepenuhnya oleh sistem PLTS. Dan jika semua beban rumah tinggal menerapkan sistem ini, maka akan jauh lebih besar penghematan energi jaringan grid. Dimana sistem grid masih menggunakan sumber energi fosil sebagai bahan primernya. Dengan pola sistem ini secara tidak langsung telah mengurangi penggunaan energi fosil dan ikut memajukan 'program 2525' yang dicanangkan pemerintah tentang penggunaan energi terbarukan.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisa dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemodelan panel surya menggunakan MATLAB simulink berhasil dirancang dengan melihat karakteristik hasil simulasi
2. Karakteristik IV dan PV panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor;
  - Irradiasi
  - Temperatur sel
  - Jumlah pemasangan seri atau paralel
3. Penghematan biaya investasi sistem PLTS pada rumah tinggal adalah dengan menggunakan topologi tanpa baterai *storage* dan konverter DC-DC.
4. Sistem kontrol sederhana yang optimal telah berhasil dirancang, dimana tegangan titik PCC sistem dijaga konstan  $\approx 220$  Volt dan nilai daya reaktif Q sistem PLTS telah mendekati nol dengan nilai maksimum pengujian 24.64Var.
5. Daya maksimum sistem PLTS didapat 419.2 W menurun akibat rugi-rugi peralatan *interface* sistem PLTS.
6. Keuntungan sistem PLTS tersambung grid pada rumah tinggal adalah adanya pola *buy-back* energi dengan manajemen beban rumah tinggal

7. Sistem PLTS tersambung grid pada rumah tinggal dapat menghemat penggunaan energi fosil dan meningkatkan penggunaan energi terbarukan.

## 5.2. Saran

Untuk penelitian selanjutnya diharapkan adanya kontrol untuk sistem proteksi sistem PLTS dari pengaruh grid saat terjadi gangguan seperti pengaruh transien (*over/under*) arus dan tegangan untuk menjaga keandalan sistem PLTS pada rumah tinggal.





## DAFTAR KEPUSTAKAAN

- [1] Jaleel, Dr. J. Abdul., dkk (2012). **Simulation on Maximum Power Point Tracking of the Photovoltaic Module using LabVIEW**. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 1, Issue 3, September 2012
- [2] Tumiran (2012). **Skenario Kebijakan Energy Nasional Menuju Tahun 2050**. Dewan energy nasional 2012
- [3] PT. PLN (Persero).2012. **Statistik PLN 2011**. ISSN 0852-8179 No:02401.120722
- [4] **PP No 14 Tahun 2012**.  
<http://www.pln.co.id/dataweb/STAT/STAT2011IND.pdf>. Akses online tanggal 24 november 2012
- [5] Hernanz, J.A. Ramos-., dkk (2012). **Two Photovoltaic Cell Simulation Models In Matlab/Simulink**. International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering. March 2012 issue 10 Volume 4 Number 1 Pages 45-51
- [6] PT. Green Power (2012). **Agen Resmi Solar cell di (PLTS) Tenaga Surya**.  
<http://www.kaskus.co.id/thread/508f3ab81b76080865000004/agen-resmi-solar-cell-di-plts-tenaga-suryaharga-dan-qualitas-bisa-di-buktikan>. Diakses tanggal 24 november 2012
- [7] Teknotrek. 2012. **Konsep Net Metering Jual Beli Listrik Sel Surya Rumahan Dengan PLN**. <http://teknotrek.blogspot.com/2012/07/konsepnet-metering-jual-beli-listrik.html>. Akses online tanggal 24 november 2012
- [8] Purnomo, Heru., dkk (2011). **PLTS On Grid 200kWp Gili Trawangan**. PT. Len Industri (Persero)
- [9] Ki, Byung-., dkk (2012). **Implementation of Monitoring and Control Systems for 50KW PV Systems Using the Wire-Wireless Network**. International Journal of Grid and Distributed Computing Vol. 5, No. 1, March, 2012

- [10] Mahmud, M. A., dkk (2012). **Dynamic Stability of Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System Using Zero Dynamic Design Approach**. IEEE Journal Of Photovoltaics, Vol. 2, No. 4, October 2012
- [11] Budenbender, Kathrin., dkk (2011). **Multifunctional PV System Offering Additional Functionalities And Improving Grid Integration**. International journal of distributed energy resources. Volume 7 no 2 (2011) page 109-128. Manuscript received 17 November 2010
- [12] Kirmani, Sheeraz et. al (2010). **Techno Economic Feasibility Analysis of a Stand-Alone PV System to Electrify a Rural Area Household in India**. International Journal of Engineering Science and Technology Vol. 2(10), 2010, 5231-5237
- [13] Fu Wu, Tsai-, dkk (2011). **Power Loss Comparison of Single- and Two-Stage Grid-Connected Photovoltaic Systems**. IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 26, No. 2, June 2011
- [14] Azhar, Mahbub (2012). **Perbandingan Efisiensi Konversi Panel Surya Yang Dipasang Fix dan Dipasang Mengikuti Sudut Datar Sinar Matahari**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas
- [15] Suparman, dkk (2007). **Analisis Pengaruh Pola Beban Pada Pengembangan Kelistrikan Dengan Opsi Nuklir**. Prosiding Seminar Nasional Ke-13 Teknologi Dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir. PPTN BATAN ISSN 0854-2910
- [16] Kamtex Industries Pte Ltd. **Nd-T060m1 Poly-Crystalline Silicon Photovoltaic Module With 60W Maximum Power**
- [17] Dr. Salam, Zainal Setiono. **Power Electronics and Drives (Version 2)**
- [18] M. H. Rashid ( 1999). **Elektronika Daya: Rangkaian, Devais dan Aplikasinya, Jilid 1**, terjemahan Ary Prihatmanto MS, PT Prenhallindo
- [19] Hamed, Basil M., dkk. (2012). **Fuzzy Controller Design using FPGA for Sun Tracking in Solar Array System**. I.J. Intelligent Systems and Applications, 2012, 1, 46-52



- [20] Hamed ,Basil M., dkk.(2012). **Fuzzy Controller Design Using FPGA for Photovoltaic Maximum Power Point Tracking**. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, Vol. 1, No. 3, 2012
- [21] Falfi, Muhammad Rizal, dkk. (2012). **Sistem Kontrol PV-Baterai Berbasis Fuzzy Logic untuk Pembangkit Terdistribusi**. Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS. diakses 11 juni 2012
- [22] Tomova, Angelina. (2011). **Grid Connected PV Inverter Topologies an Overview**. DERlab Young researchers and PhD seminar "Distributed generation and renewable energy sources" 07 April 2011, Glasgow, UK
- [23] Fakham, Hicham, dkk. (2011). **Power Control Design of a Battery Charger In A Hybrid Active PV Generator For Load Following Applications**. IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 58, Iss. 1 , pp. 85-94, Jan. 2011, TIE-09-1370
- [24] B, C. Liu., dkk.(2004). **Advanced Algorithm For Mppt Control Of Photovoltaic Systems**. Canadian Solar Buildings Conference Montreal, August 20-24, 2004 Refereed Paper
- [25] Esram, Trishan, dkk. (2007). **Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques**. IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, June 2007 439
- [26] Li, Huijuan, dkk.( ) **Real and Reactive Power Control of a Three-Phase Single-Stage PV System and PV Voltage Stability**. UT-Battelle, LLC, under Contract No. DE-AC05-00OR22725 with the U.S. Department of Energy
- [27] Azzakir, R. (2009) **Simulasi Pemasangan Inverter Satu Fasa dengan Jaringan Listrik**. Tugas akhir sarjana. Teknik elektro fakultas teknik universitas andalas



## LAMPIRAN 1

### DATA PENGUJIAN AWAL DENGAN PENGATURAN MANUAL

Beban	Irr W/m2	Pref (W)	a(t)	V <sub>pec</sub> (V)	V <sub>inv</sub> (V)	ma	P (W)	Q (Var)	a	a rad	tan a	Cos a	X <sub>l</sub> Pref
800	1000	649.8	0.01955	219.8	189.7	0.4381	467	24.69	8.381295	0.146281	0.147334	0.989319971	10.9541183
300	600	370.9	0.019792	219.9	161.6	0.505	208	17.35	4.028777	0.070315	0.070432	0.997528889	9.182497132
200	1000	649.8	0.01958	219.9	192.9	0.4199	457.9	-26.09	7.841727	0.136864	0.137725	0.990648741	10.24904569
800	600	370.9	0.019845	219.7	191.8	0.4259	160.6	32.41	3.07554	0.053678	0.05373	0.998559666	6.992288953
600	600	370.9	0.0198	219.6	174.9	0.4672	201.9	29.74	3.884892	0.067804	0.067908	0.997702179	8.829384354
200	600	370.9	0.01979	219.9	164.2	0.4963	202.7	-14.16	4.064748	0.070943	0.071062	0.997484584	9.264758229
900	1000	649.8	0.01958	219.7	155.9	0.5385	450.8	84.71	7.841727	0.136864	0.137725	0.990648741	10.23041106
600	1000	649.8	0.01954	219.9	179.4	0.4661	476.6	53	8.561151	0.14942	0.150542	0.988857545	11.20287021
450	1000	649.8	0.019535	219.5	167.6	0.4837	462.5	-30.76	8.651079	0.15099	0.152148	0.988622678	11.28119228
450	500	301.4	0.01989	219.8	185.5	0.4399	110.3	33.31	2.266187	0.039552	0.039573	0.999217905	6.343249608
300	1000	649.8	0.01954	220	167.5	0.4933	467.5	9.112	8.561151	0.14942	0.150542	0.988857545	11.21306158
100	1000	649.8	0.019581	220.4	154	0.5322	443.2	3.816	7.823741	0.13655	0.137405	0.99069152	10.27179597
100	1000	649.8	0.01967	220.1	124.3	0.6564	370.9	-15.22	6.223022	0.108612	0.109041	0.994107489	8.129269171
300	1000	649.8	0.019538	219.8	169.9	0.4851	467.6	11.58	8.597122	0.150048	0.151184	0.98876389	11.24042341
300	1000	649.8	0.019538	219.7	165.3	0.4934	459	-16.62	8.597122	0.150048	0.151184	0.98876389	11.23019787
300	1000	649.8	0.019538	219.8	167.9	0.4877	465.3	-5.67	8.597122	0.150048	0.151184	0.98876389	11.24042341
300	1000	649.8	0.019538	219.7	172.6	0.478	460.3	1.522	8.597122	0.150048	0.151184	0.98876389	11.23019787
300	1000	649.8	0.019536	219.7	177.4	0.4641	473.7	5.111	8.633094	0.150676	0.151827	0.988669846	11.27790344
300	1000	649.8	0.019538	219.9	165.8	0.4932	454.5	-22.73	8.597122	0.150048	0.151184	0.98876389	11.2506536
300	900	579.9	0.0196	219.9	170.8	0.485	408.3	-1.783	7.482014	0.130586	0.131333	0.991485786	10.95145316
300	800	510.1	0.019673	219.8	164.8	0.4927	333.1	-5.34	6.169065	0.10767	0.108089	0.99420913	10.23716145
300	700	440.5	0.01973	219.7	166.4	0.4927	272.8	-13.83	5.143885	0.089778	0.09002	0.995972686	9.863971754
300	600	370.9	0.019792	219.9	161.6	0.505	208	17.35	4.028777	0.070315	0.070432	0.997528889	9.182497132
300	500	301.4	0.019856	219.7	162.2	0.4987	137.3	-7.121	2.877698	0.050225	0.050268	0.998738975	8.050165717

## LAMPIRAN 2

### PERHITUNGAN DAN HASIL SIMULASI MATLAB ALIRAN DAYA OPTIMAL SISTEM PLTS TERSAMBUNG KE GRID DENGAN METODE NEWTON RAPHSON

#### 2.1. Perhitungan $\alpha$ dan $m_a$ Sebagai Akar Persamaan

Persamaan daya system PLTS tersambung Grid

$$P = \frac{V_{inv} V_g}{X_l} \sin \delta$$

$$Q = \frac{V_{inv} V_g}{X_l} \cos \delta - \frac{V_g^2}{X_l}$$

$$V_{in} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} m_a$$

$$V_{in} = \frac{V_{inv}}{a}$$

Dengan mengharapkan P maksimum dan Q bernilai minimum, maka  $Q=0$  dan  $P=P_{max}$

$$P_{max} = 649.8W$$

$$V_{dc} = 198.3 V$$

$$X_l = 10.04407446$$

$$V_g = 220 V$$

$$A = 230/60$$

**Hasil penyelesaian dengan substitusi:**

$$\text{Alfa (t)} = 0.01959 = 7.661705035971^\circ = 0.133654187 \text{ rad}$$

$$M_a = 0.413$$



## Penyelesaian dengan Metode Newton Raphson

Persamaan G dan H

$$G(m_a, \delta) = G_i = \frac{(V_{dc}/\sqrt{2})am_aV_g}{X_l} \sin \delta - P_{\max} = 0 \dots \dots (1)$$

$$H(m_a, \delta) = H_i = \frac{(V_{dc}/\sqrt{2})am_aV_g}{X_l} \cos \delta - \frac{V_g^2}{X_l} = 0 \dots \dots (2)$$

Penyelesaian matrik Jacobian

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial G(m_a, \delta)}{\partial m_a} & \frac{\partial G(m_a, \delta)}{\partial \delta} \\ \frac{\partial H(m_a, \delta)}{\partial m_a} & \frac{\partial H(m_a, \delta)}{\partial \delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_a \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G_i \\ -H_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{(V_{dc}/\sqrt{2})aV_g}{X_l} \sin \delta & \frac{(V_{dc}/\sqrt{2})aV_gm_a}{X_l} \cos \delta \\ \frac{(V_{dc}/\sqrt{2})aV_g}{X_l} \cos \delta & -\frac{(V_{dc}/\sqrt{2})aV_gm_a}{X_l} \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_a \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G_i \\ -H_i \end{bmatrix}$$

Nilai tebakan awal untuk iterasi

$$m_a0 = 0.4$$

$$\delta0 = 0.13$$

$$\text{Epsilon} = 0.00001$$

$$m_a = m_a0 + \Delta m_a$$

$$\delta = \delta0 + \Delta \delta$$

Iterasi 1

$$\begin{bmatrix} 1.5262e3 & 4.6696e3 \\ 1.1674e4 & -610.4870 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_a \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 39.3130 \\ 149.1917 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} \Delta m_a \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0130 \\ 0.0042 \end{bmatrix}$$

Iterasi 2

$$m_a = 0.413$$

$$\delta = 0.1342$$

$$\begin{bmatrix} 0.1575e4 & 0.4819e4 \\ 1.1667e4 & -0.0651e4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_a \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.7718 \\ 0.1206 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta m_a \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0014e-3 \\ -0.1606e-3 \end{bmatrix}$$

Iterasi 3

$$m_a = 0.4130014$$

$$\delta = 0.1340394$$

$$\begin{bmatrix} 0.1573e4 & 0.4819e4 \\ 1.1668e4 & -0.0650e4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_a \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1622e-3 \\ -0.1911e-3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta m_a \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1793e-7 \\ -0.2781e-7 \end{bmatrix}$$

Hasil iterasi Newton Raphson:

$$m_a = 0.41300137$$

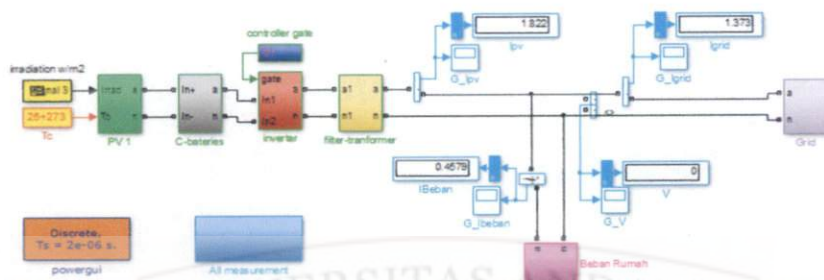
$$\delta = 0.13403938$$

Hasil iterasi menunjukkan nilai mutlak delta alfa dan delta ma < dari nilai epsilon setelah iterasi ke-3 dengan nilai alfa dan indeks modulasi sama dengan hasil simulasi.

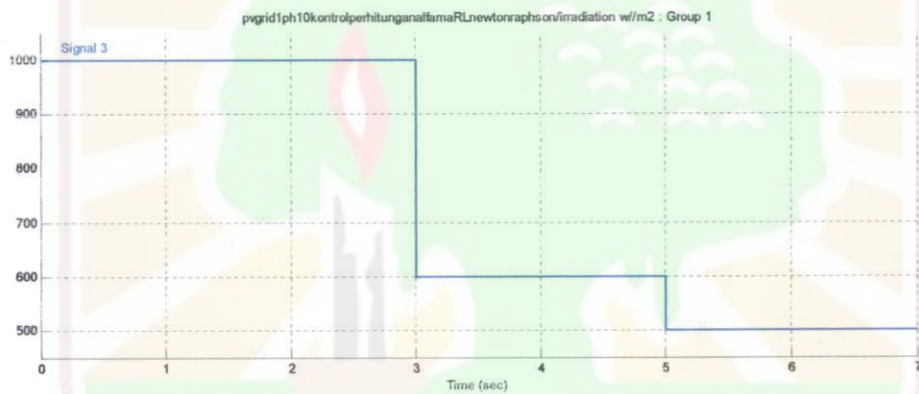
## 2.2. Hasil Simulasi Kontrol $\alpha$ dan $m_a$ dengan Metode Newton Raphson

Pengujian dilakukan untuk satu mode sistem dimana Irradiasi berubah dan beban berubah. Gambar rangkaian dan variasi system dapat dilihat pada gambar berikut.

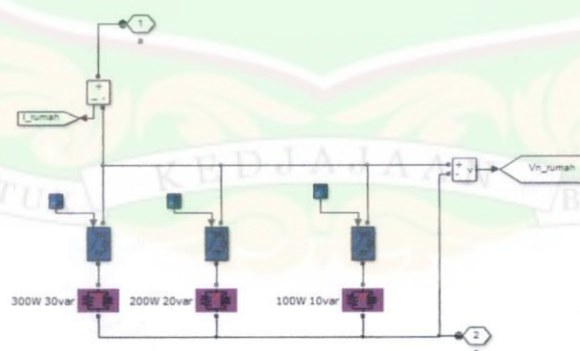
### PV Array Connected - Single Phase Grid at Home



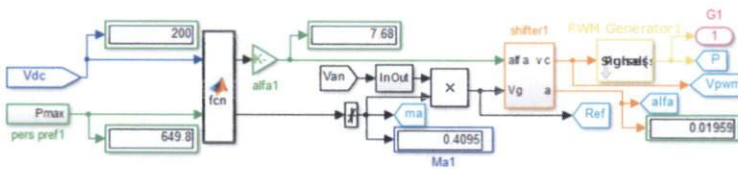
Gambar 1. Rangkaian Simulasi Lengkap PV Tersambung Grid dengan Kontrol Metode Newton



Gambar 2. Variasi Signal Input Irradiasi



Gambar 3. Variasi Beban Rumah Tangga



Gambar 4. Rangkaian Kontrol Sistem Dengan Metode Newton Raphson

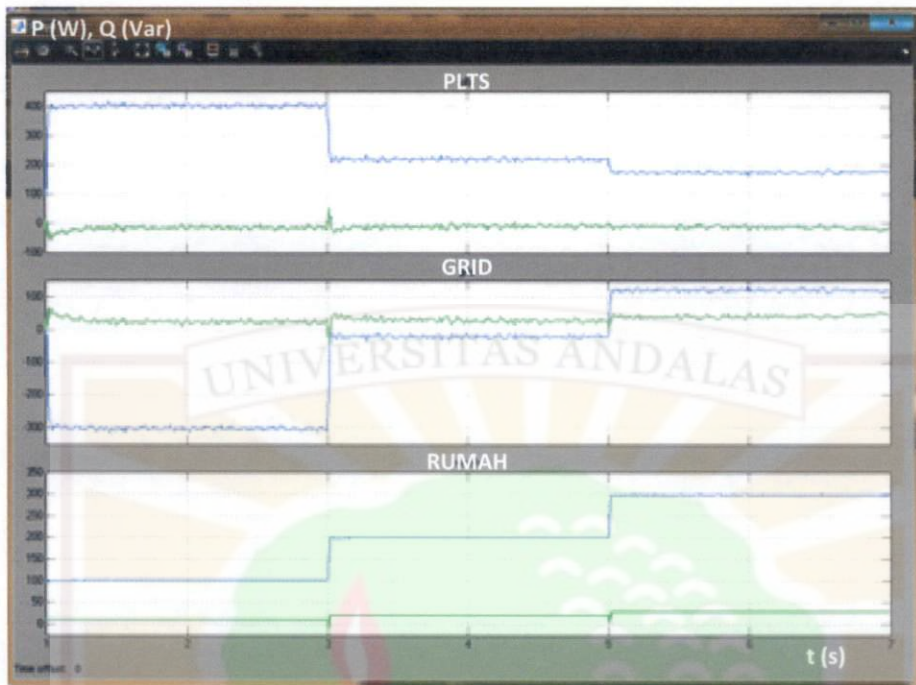
Adapun aliran daya hasil simulais MATLAB menggunakan pengontrolan dengan metode Newton Raphson terlihat pada table 1 dibawah.

Tabel 1. Aliran Daya Sistem PLTS Tersambung Grid Irradiasi dan Beban  
Berubah

No	Irradiasi W/m2	Beban Rumah	Vpcc (Volt)	Daya aktif P (W)			Daya reaktif Q (var)		
				PLTS	Grid	Ruma h	PLTS	Grid	Rumah
1	1000	100W 10Var	220.3	408	-307.9	100.1	-11.7	21.7	9.998
2	600	200W 20Var	219.9	221.1	-21.4	199.7	-11.82	31.78	19.96
3	500	300W 30Var	219.7	178.8	120.3	299.1	-9.371	39.27	29.9

Dengan kurva aliran daya seperti terlihat pada gambar dibawah berikut ini. Tegangan PCC pun terjaga konstan 220 Volt.

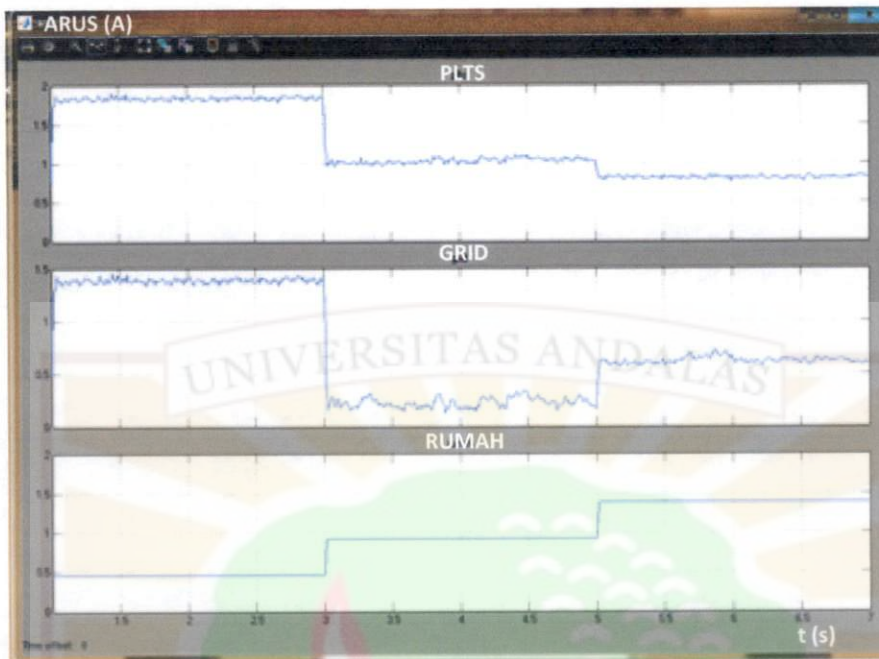




Gambar 5. Kurva Aliran Daya System PLTS Tersambung Grid

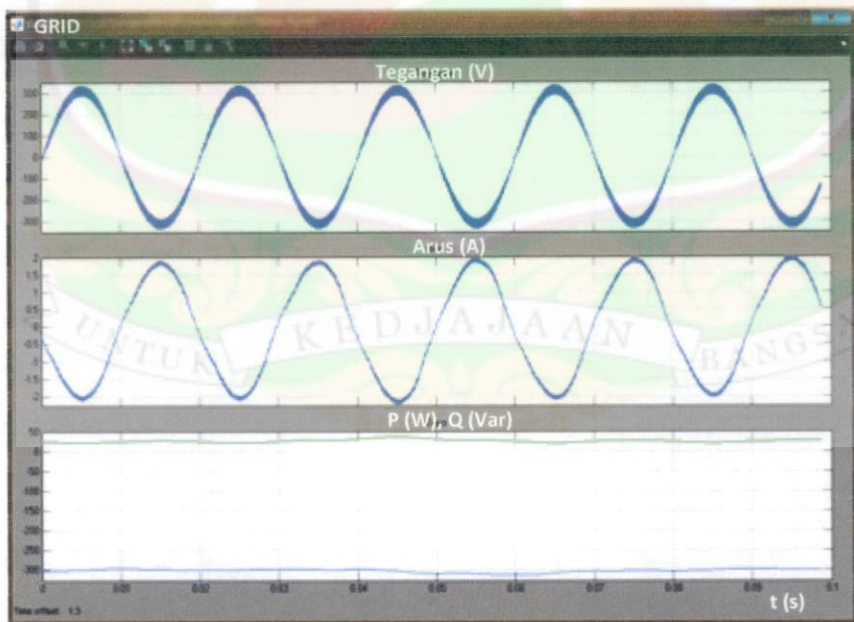


Gambar 6. Kurva Tegangan PCC System PLTS Tersambung Grid

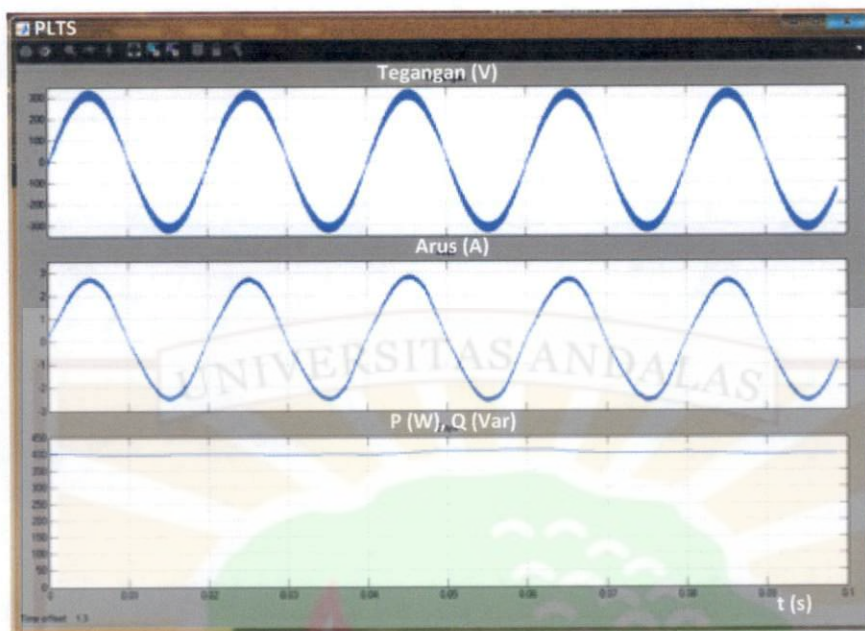


Gambar 7. Kurva Arus System PLTS Tersambung Grid

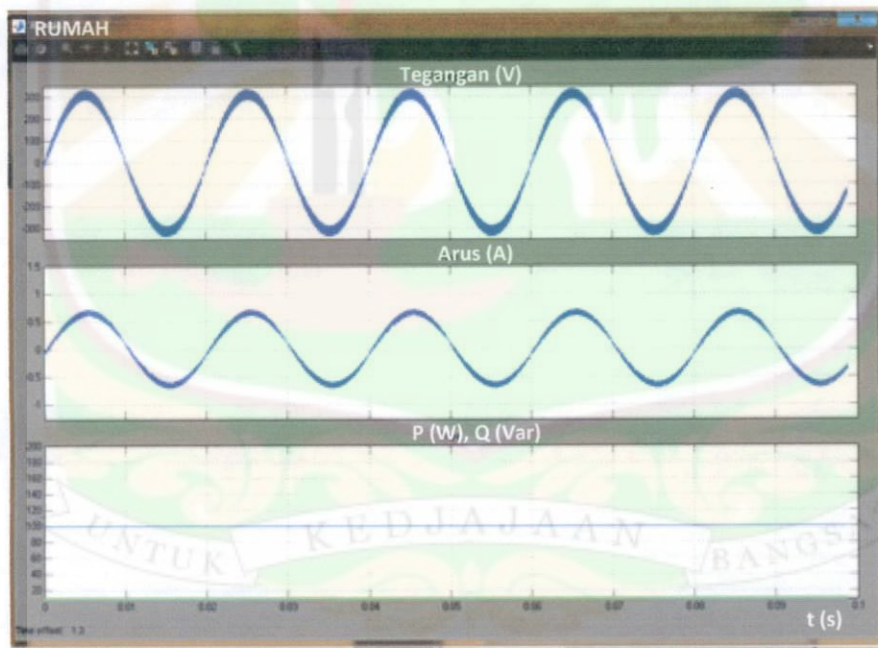
Waktu1



Gambar 8. Bentuk Gelombang Sisi Sistem Grid



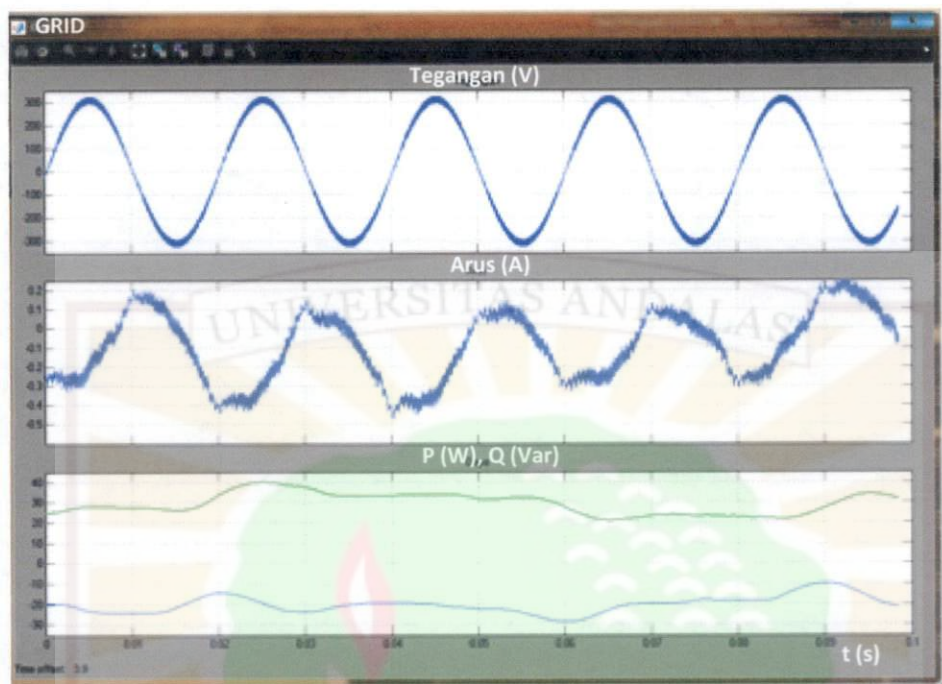
*Gambar 9. Bentuk Gelombang Sisi Sistem Plts*



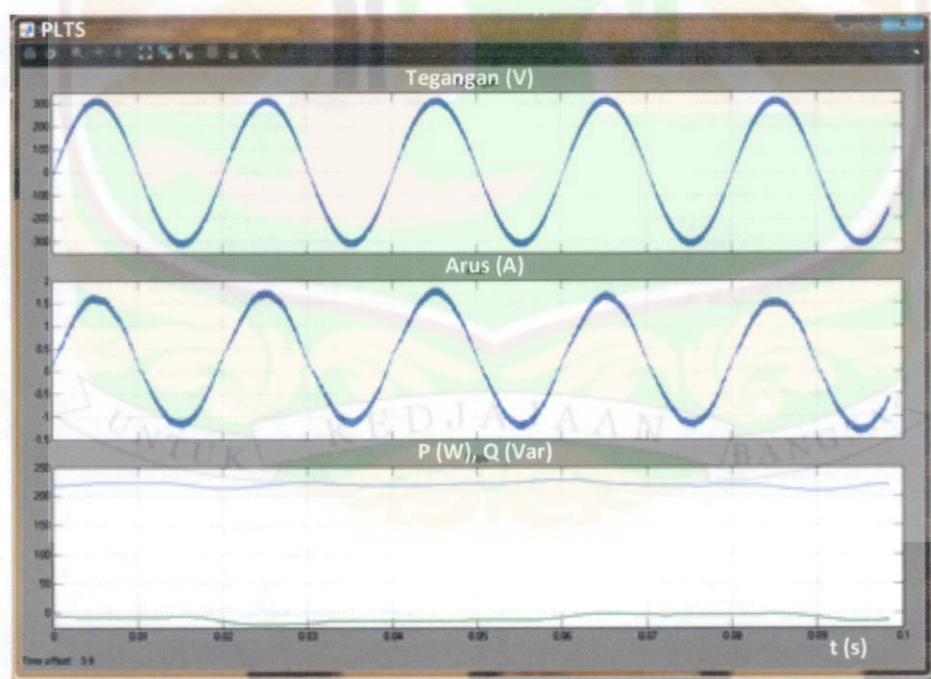
*Gambar 10. Bentuk Gelombang Sisi Sistem Beban Rumah*



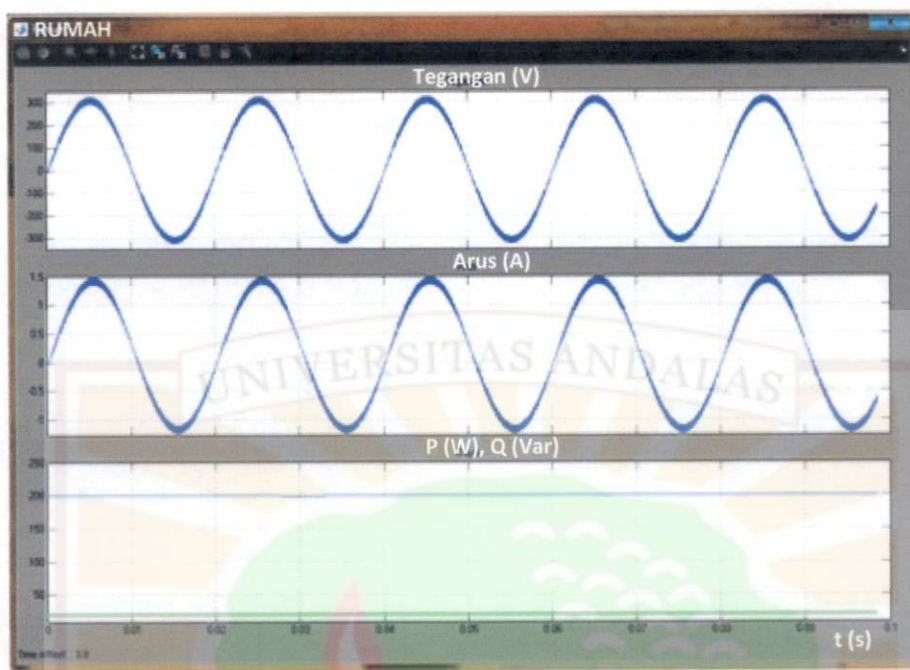
Waktu2



Gambar 11. Bentuk Gelombang Sisi Sistem Grid

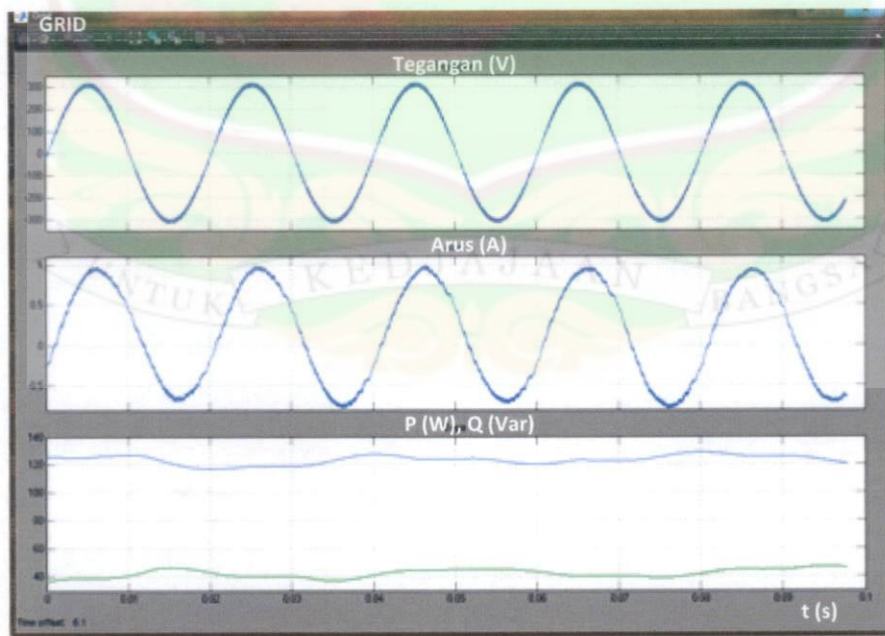


Gambar 12. Bentuk Gelombang Sisi Sistem Plts

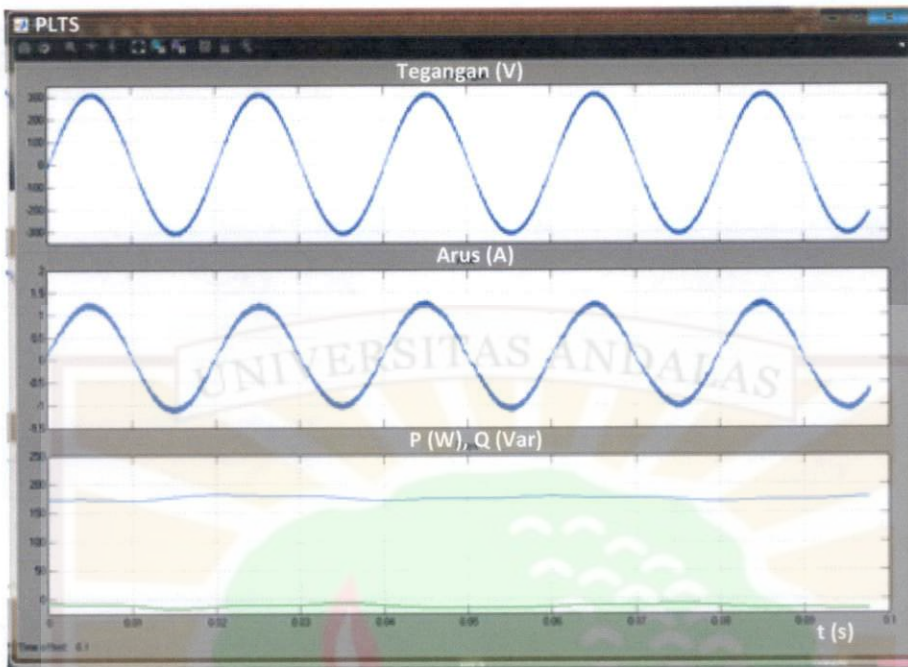


*Gambar 13. Bentuk Gelombang Sisi Sistem Beban Rumah*

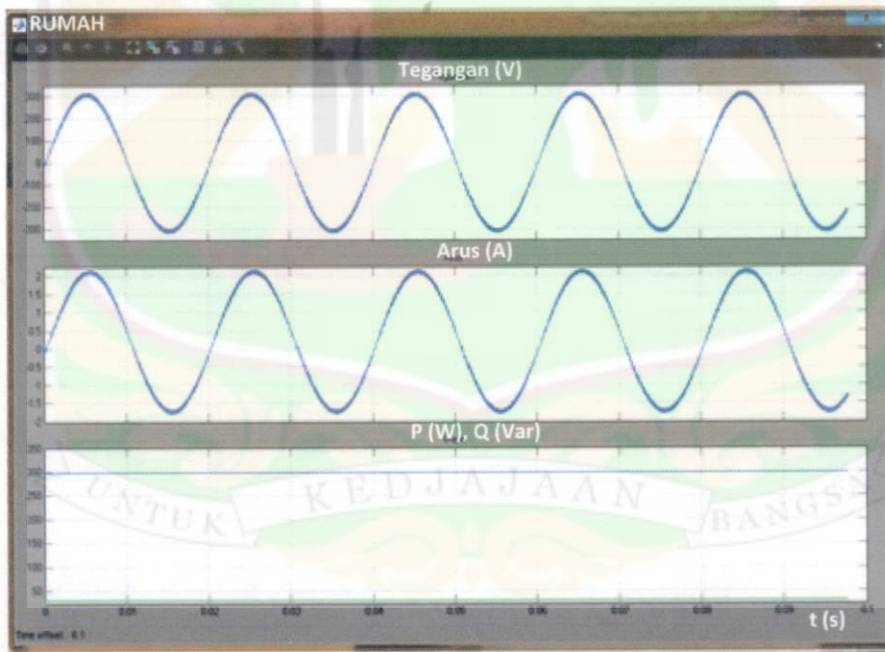
**Waktu3**



*Gambar 14. Bentuk Gelombang Sisi Sistem Grid*



*Gambar 15. Bentuk Gelombang Sisi Sistem Plts*



*Gambar 16. Bentuk Gelombang Sisi Sistem Beban Rumah*

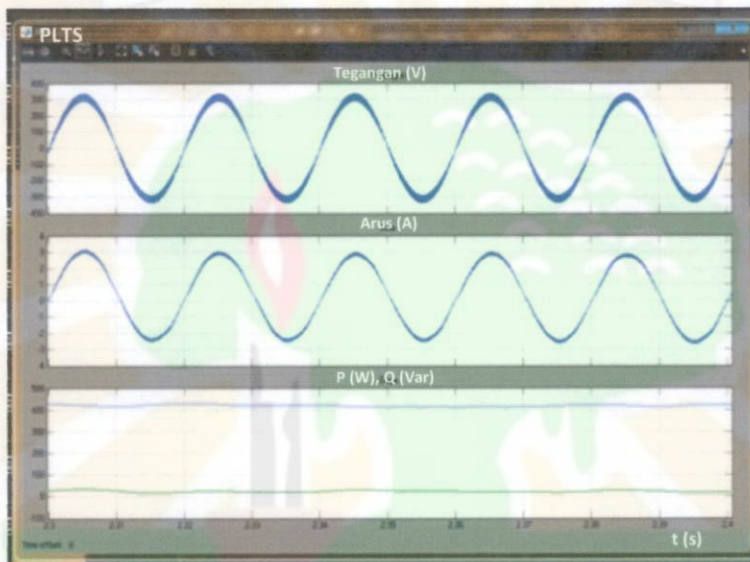


### LAMPIRAN 3

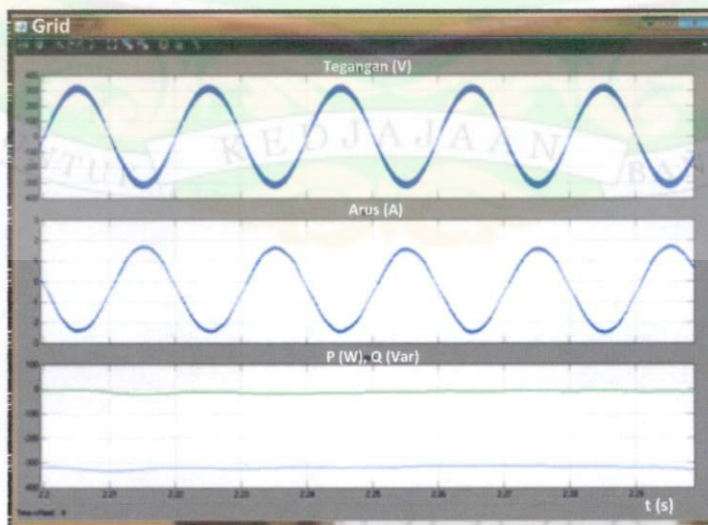
#### HASIL PENGUJIAN TERKONTROL SISTEM PLTS TERSAMBUNG GRID PADA RUMAH TINGGAL

##### 1. Irradiasi Konstan dan Beban berubah

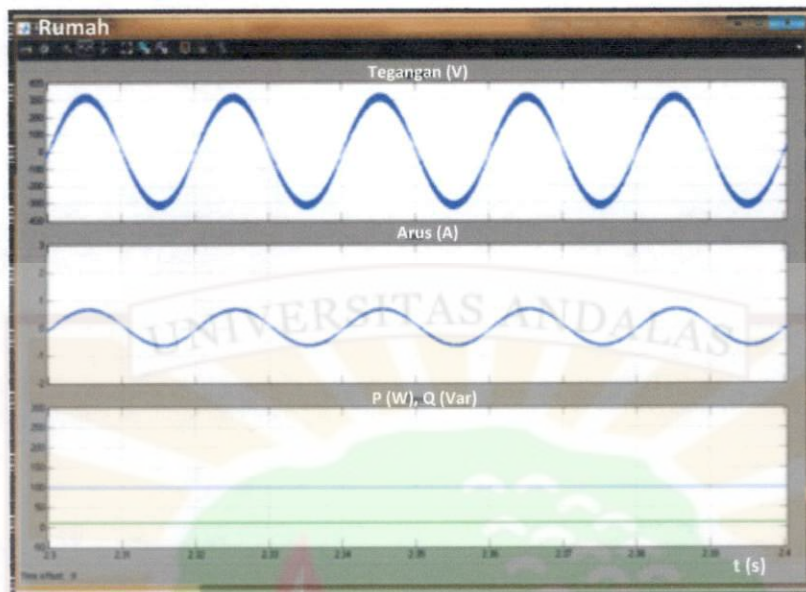
Waktu -1



Gambar 1. Bentuk Gelombang Sisi Sistem PLTS

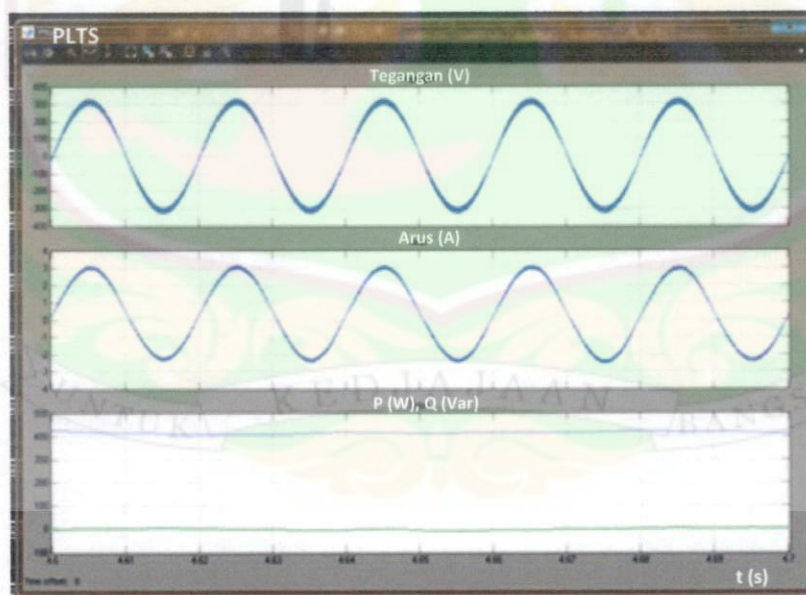


Gambar 2. Bentuk Gelombang Sisi Grid

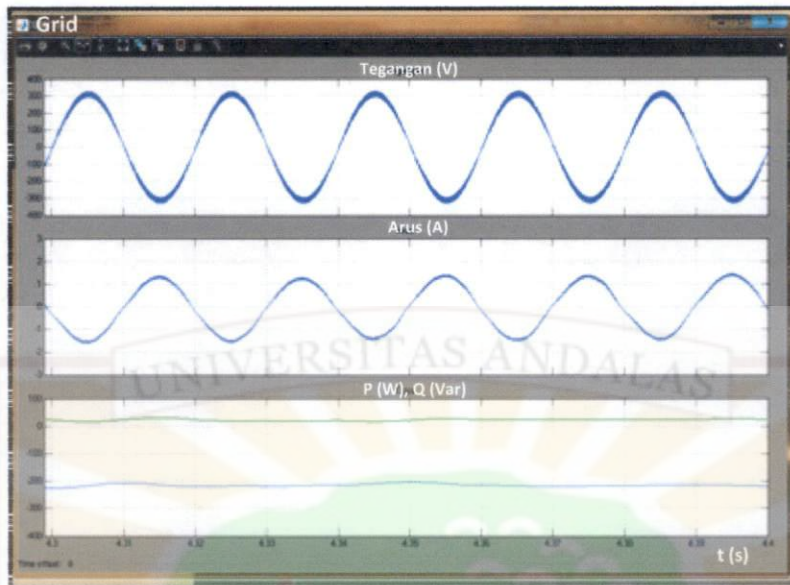


Gambar 3. Bentuk Gelombang Sisi Beban Rumah Tinggal

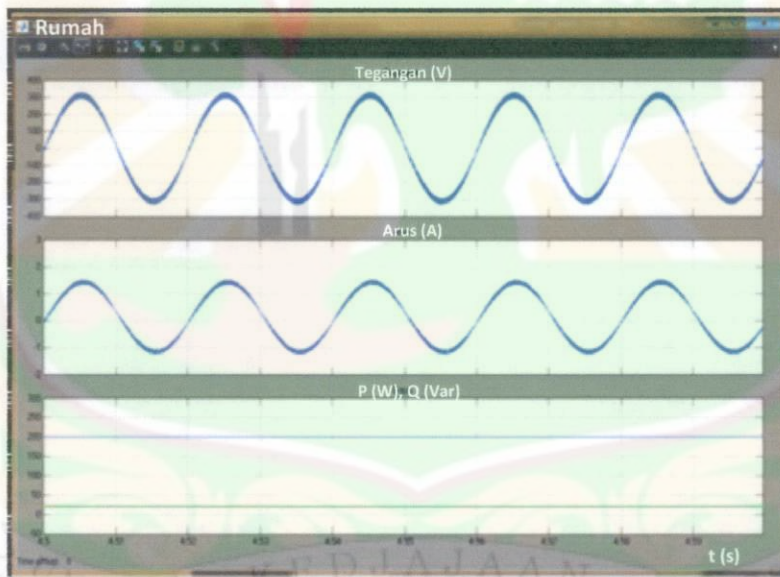
Waktu -2



Gambar 4. Bentuk Gelombang Sisi Sistem PLTS



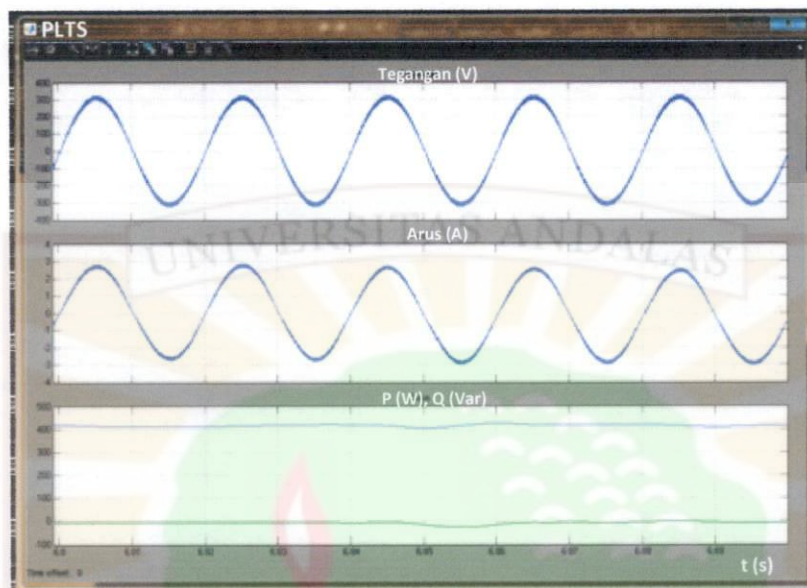
Gambar 5. Bentuk Gelombang Sisi Grid



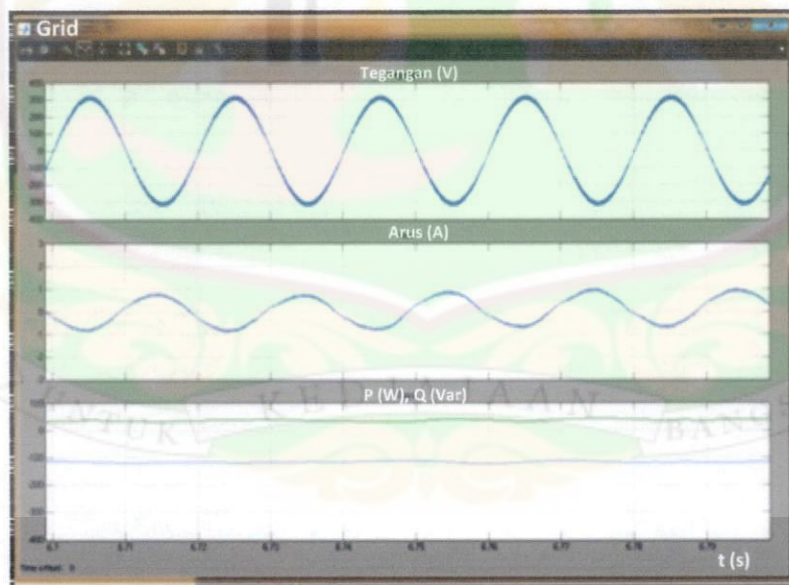
Gambar 6. Bentuk Gelombang Sisi Beban Rumah Tinggal



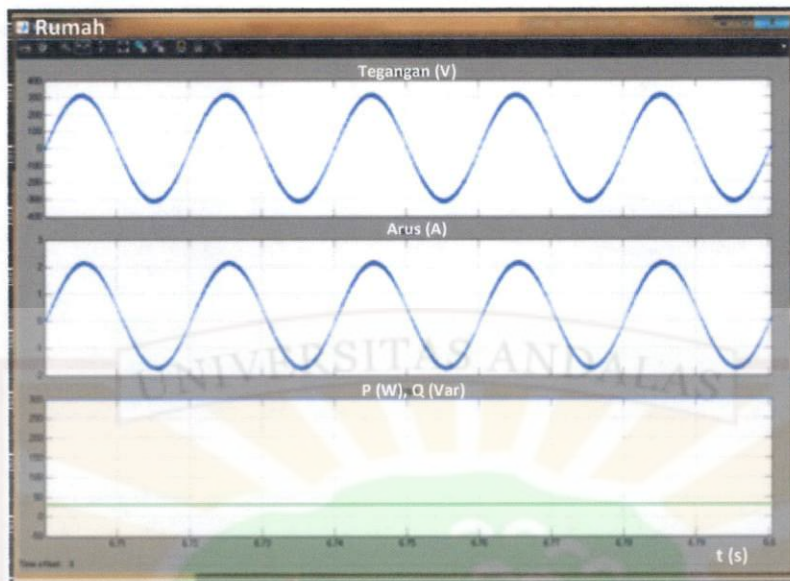
Waktu -3



Gambar 7. Bentuk Gelombang Sisi Sistem PLTS



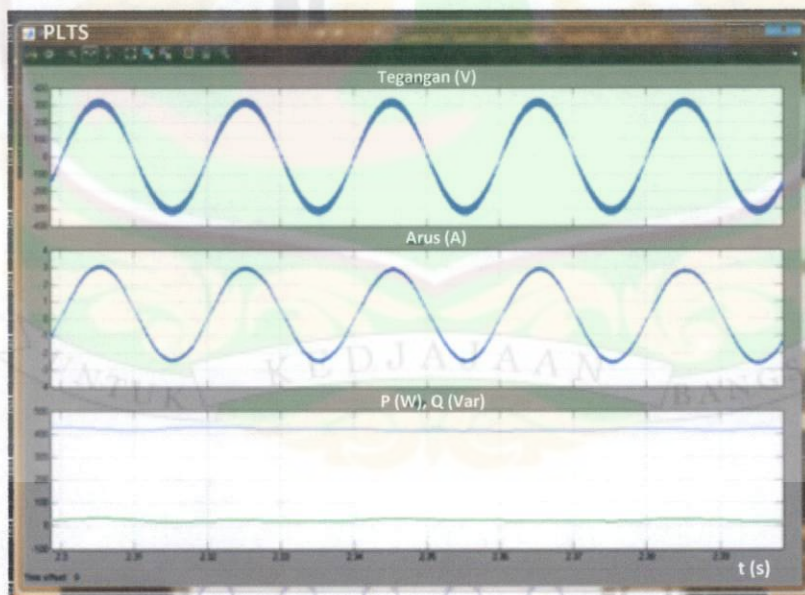
Gambar 8. Bentuk Gelombang Sisi Grid



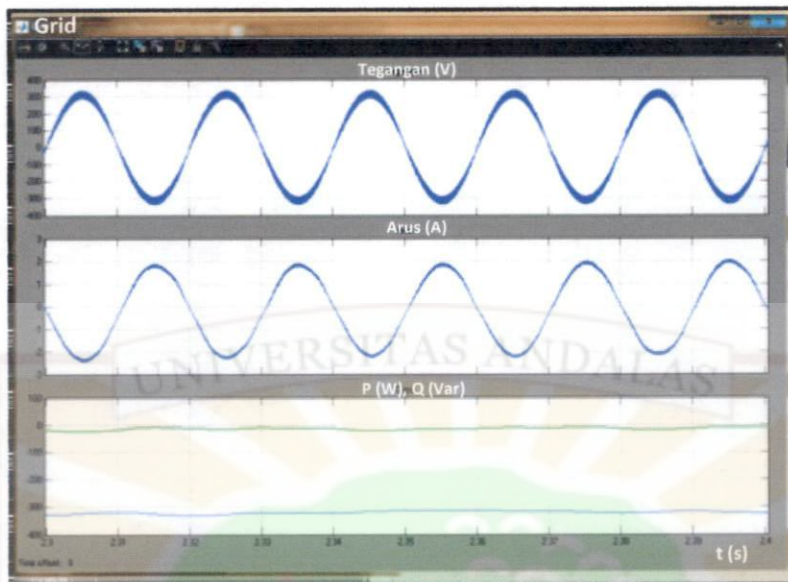
Gambar 9. Bentuk Gelombang Sisi Beban Rumah Tinggal

## 2. Irradiasi Berubah dan Beban Konstan

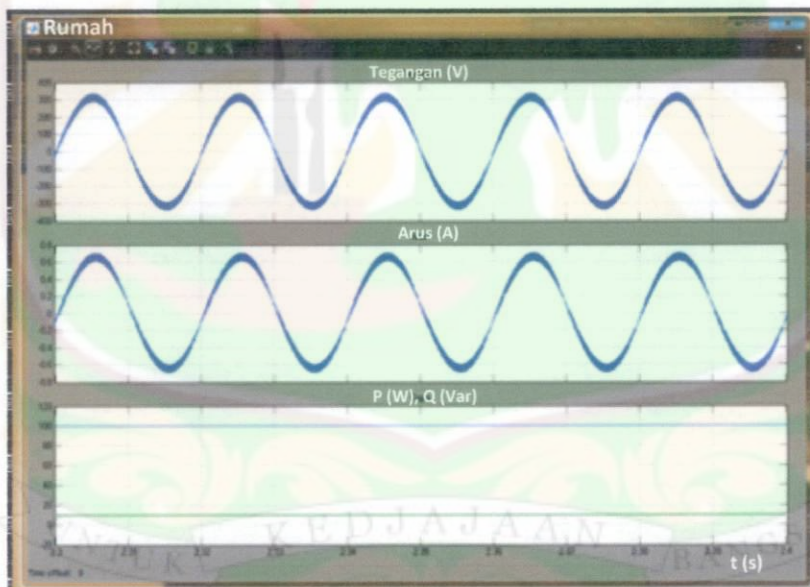
Waktu -1



Gambar 10. Bentuk Gelombang Sisi Sistem PLTS



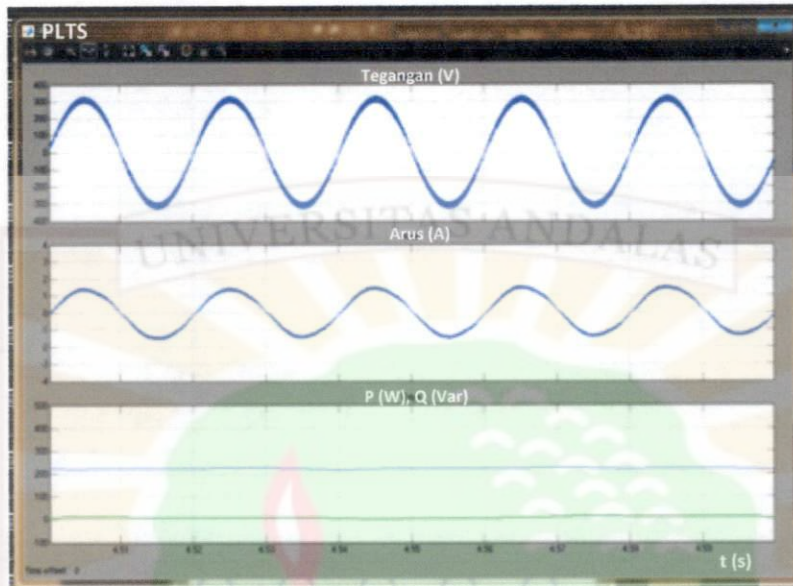
Gambar 11. Bentuk Gelombang Sisi Grid



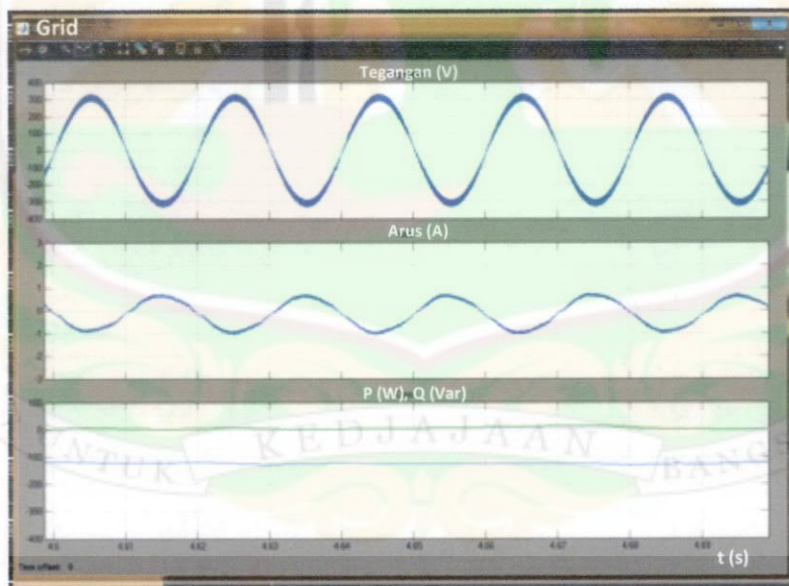
Gambar 12. Bentuk Gelombang Sisi Beban Rumah Tinggal



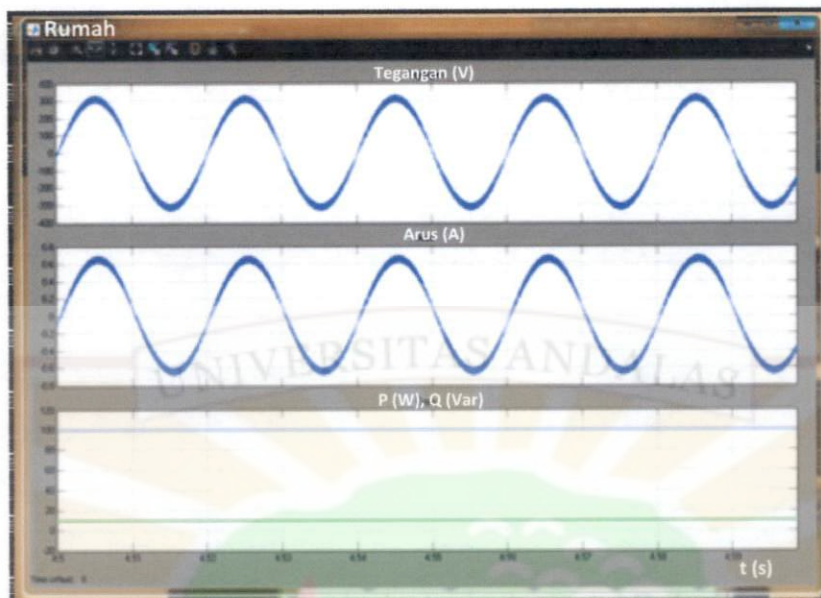
Waktu -2



Gambar 13. Bentuk Gelombang Sisi Sistem PLTS

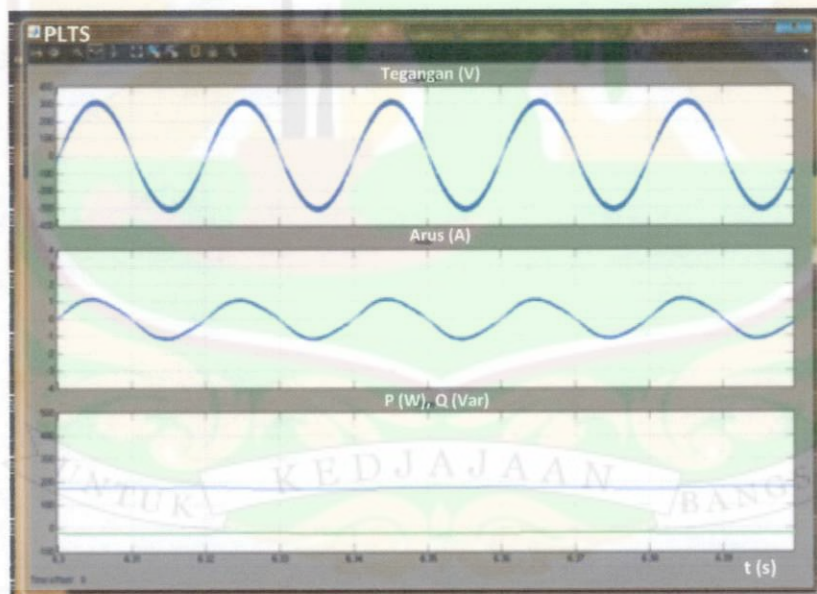


Gambar 14. Bentuk Gelombang Sisi Grid

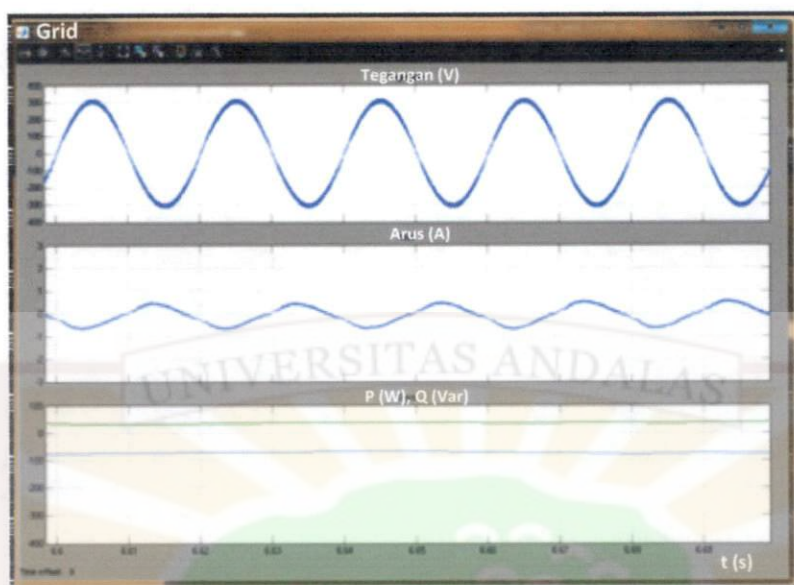


Gambar 15. Bentuk Gelombang Sisi Beban Rumah Tinggal

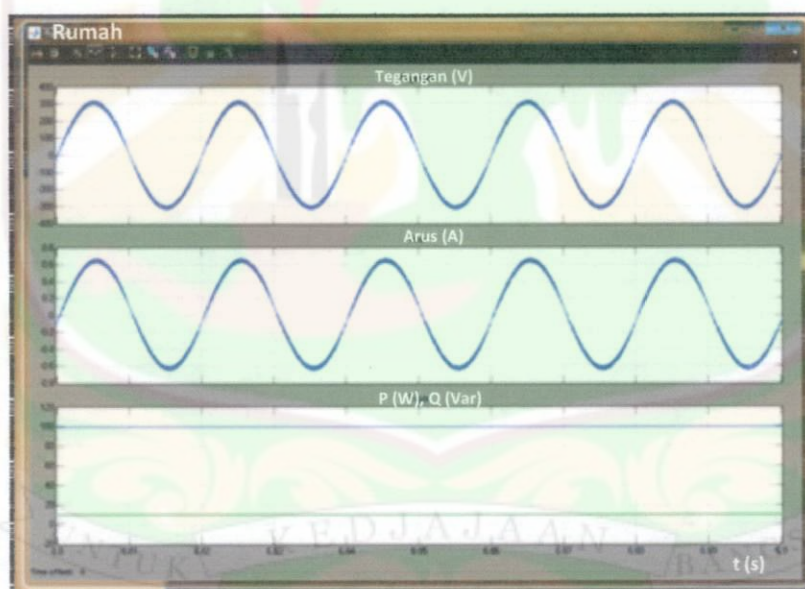
Waktu -3



Gambar 16. Bentuk Gelombang Sisi Sistem PLTS



Gambar 17. Bentuk Gelombang Sisi Grid



Gambar 18. Bentuk Gelombang Sisi Beban Rumah Tinggal